

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



“ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA DESALINIZAR AGUA DE MAR, POR OSMOSIS INVERSA, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR Y CICLO DE RANKINE ORGÁNICO”

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Sr. Reinaldo Sánchez Arriagada

JAVIER ANDRÉS ECHAVARRÍA ARANEDA

CONCEPCIÓN – CHILE

2015

RESUMEN

El presente proyecto consta de un estudio técnico y económico para una planta desalinizadora por osmosis inversa, usando como sistema de alimentación principal el ciclo Rankine orgánico solar.

Para el sistema de ciclo Rankine orgánico se estableció una generación de trabajo en la turbina de 36[kW] y para ello se estudiaron diferentes fluidos de trabajo, que corresponden a: isobutano, butano, isopentano, pentano, hexano, heptano, ciclohexano, octano y tolueno. De éstos, se seleccionó el que obtuvo el mayor rendimiento térmico dentro del ciclo.

Para dimensionar la planta solar se realizó un estudio sobre las localidades en Chile analizando parámetros de radiación solar y temperatura ambiente, concluyendo que la ciudad de Antofagasta y cercanías fue la más adecuada. Además, se utilizó el CCP LS-3 para la obtención del área de apertura necesaria en cada caso.

En el sistema de osmosis inversa se establecieron 3 escenarios a evaluar. Estos 3 escenarios difieren en su alimentación energética, añadiéndose, en 2 escenarios, conexión con el SING. Estos escenarios, por ende, tuvieron distintas producciones de agua dulce como producto y distintas rentabilidades económicas.

Finalmente, se realizó el análisis económico para estos 3 escenarios. En éste, se estudió la influencia del valor de venta del agua por m^3 y el horizonte de evaluación que se asigne.

Los resultados obtenidos, indicaron que el proyecto no logró ser rentable si se trabaja sólo con la energía proveniente de la planta solar. Sin embargo, éste logró ser rentable cuando funciona tanto con energía solar como energía del SING.

ÍNDICE

1.1	Introducción.....	7
1.2	Objetivos	8
1.2.1	Objetivos generales	8
1.2.2	Objetivos específicos	9
1.3	Antecedentes globales.....	9
1.4	Antecedentes en Chile	11
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA		13
2.1	Ciclo Rankine orgánico solar simple	14
CAPITULO 3: CICLO RANKINE ORGÁNICO		16
3.1	Ecuaciones y variables del proceso	19
3.2	Fluidos de trabajo.....	21
3.2.1	Características deseables	21
3.2.2	Selección previa de sustancias	22
3.2.3	Presentación de los fluidos seleccionados	23
3.2.4	Seguridad y toxicidad	24
3.3	Cálculos de los fluidos de trabajo en CRO.....	25
CAPITULO 4: ENERGÍA SOLAR		31
4.1	Radiación solar	31
4.2	Sistemas de captación solar	36
4.3	Captador solar térmico CCP LS-3.....	38
4.3.1	Especificaciones técnicas del CCP LS-3.....	41
4.4	Dimensión de la planta solar térmica	41
4.5	Cálculos referidos a la planta solar con CCP LS-3 en las ciudades seleccionadas	42
CAPITULO 5: SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA.....		45
5.1	Esquema planta osmosis inversa.....	46
5.2	Descripción de procesos de desalación por osmosis inversa	47

5.2.1	<i>Captación de agua de mar o salobre:</i>	47
5.2.2	<i>Pre-tratamientos:</i>	47
5.2.3	<i>Proceso de osmosis inversa</i>	49
5.2.4	<i>Post-tratamientos</i>	49
5.3	Sistema de recuperación de energía	50
5.4	Cálculos en osmosis inversa y flujo de agua desalinizado	53
CAPITULO 6: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PLANTA		55
6.1	Flujo de caja	55
6.2	Ingresos	56
6.3	Costos fijos	57
6.3.1	<i>Costos de inversión</i>	57
6.3.2	<i>Costos de operación y mantenimiento (O&M)</i>	58
6.4	Costos variables	58
6.5	Depreciación y valor residual	59
6.6	Resultados	59
6.6.1	<i>Resultados escenario 1</i>	59
6.6.2	<i>Resultados escenario 2</i>	60
6.6.3	<i>Resultados escenario 3</i>	61
CONCLUSIONES		63
REFERENCIAS		65
ANEXOS		67
Anexo A		67
Anexo B		69

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1 Ranking mundial de los diez países con mayor capacidad para desalar agua	10
--	----

Capítulo 3

Tabla 3.1: Datos relevantes de los fluidos de trabajo a estudiar en CRO	23
Tabla 3.2: Índices de seguridad y toxicidad de los fluidos de trabajo en CRO	24
Tabla 3.3: Valores de entrada necesarios para realizar los cálculos en CRO.....	25
Tabla 3.4: Presión y temperatura para los fluidos de trabajo en cada punto del CRO.....	26
Tabla 3.5: Valores de entalpías de los fluidos de trabajo en cada punto del CRO.....	27
Tabla 3.6: Flujo másico para los fluidos de trabajo en CRO	28
Tabla 3.7: Parámetros obtenidos de calor absorbido, trabajo en la turbina y bomba, y el rendimiento de los fluidos de trabajo en CRO	28

Capítulo 4

Tabla 4.1: Principales ciudades en Chile con su respectiva radiación solar promedio anual	33
Tabla 4.2: Valores de los coeficientes de las pérdidas térmicas dependiendo de la temperatura promedio de absorción.....	39
Tabla 4.3: Especificaciones técnicas del colector solar cilindroparabólico LS-3.....	41
Tabla 4.4: Rendimientos alcanzados en cada ciudad con el colector CCP LS-3	43
Tabla 4.5: Área de apertura necesaria para cada ciudad, con fluido de trabajo el tolueno.....	44

Capítulo 5

Tabla 5.1: Consumo eléctrico para una planta de osmosis inversa	53
--	-----------

Capítulo 6

Tabla 6.1: Parámetros económicos para el flujo de caja para el 2015	55
Tabla 6.2: Producción de agua dulce y horas de funcionamiento para cada escenario.....	56
Tabla 6.3: Valores de venta del agua producto para cada caso	57
Tabla 6.4: Especificación de costos de inversión para cada subsistema.....	57
Tabla 6.5: Especificación de costos de O&M para cada subsistema	58
Tabla 6.6: Parámetros sobre consumo eléctrico y costo de la energía.....	59
Tabla 6.7: Resultados de flujo de caja para el escenario 1	60
Tabla 6.8: Resultados de flujo de caja para el escenario 2	60
Tabla 6.9: Resultados de flujo de caja para el escenario 3	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1: Esquema representativo de la planta desalinizadora y sus demás sistemas.....	13
Figura 2.2: Flujos y transferencia de energías en un ciclo Rankine orgánico solar simple.....	15

Capítulo 3

Figura 3.1: Esquema representativo del subsistema ciclo Rankine orgánico	17
Figura 3.2: Diagrama T-s del subsistema ciclo Rankine orgánico.....	18
Figura 3.3: Gráfico del comportamiento de los fluidos de trabajo en CRO indicando calor absorbido, trabajo en la turbina y bomba.....	30

Capítulo 4

Figura 4.1: Mapa de la radiación solar recibida en todo el mundo	32
Figura 4.2: Radiación al mediodía solar superficie inclinada para el año 2014	34
Figura 4.3: Temperatura promedio mensual para el año 2014.....	35
Figura 4.4: Esquema de seguimiento solar por parte de un colector solar cilindro-parabólico	36
Figura 4.5: Rendimiento del CCP LS-3 en función de la temperatura de absorción.....	40

Capítulo 5

Figura 5.1: Esquema del proceso de osmosis y osmosis inversa.....	45
Figura 5.2: Esquema de procesos en una planta de osmosis inversa	46
Figura 5.3: Gráfico de la evolución del consumo energético a lo largo de los años.....	51
Figura 5.4: Esquema representativo del subsistema osmosis inversa.....	52

CAPITULO 1: PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Introducción

El agua dulce es un recurso natural único y escaso, esencial para la vida y las actividades productivas del ser humano, y por tanto directamente relacionado con el crecimiento social y económico del país.

El agua es uno de los recursos más abundantes en la Tierra, que alcanza hasta el 70%. De ésta cantidad, el 97% del agua de la tierra es agua salada proveniente de los océanos y un 3% es agua dulce contenida en los polos, aguas subterráneas, lagos y ríos. Casi el 70% del 3% de agua dulce del mundo está congelado en los glaciares, cubierta de nieve permanente y hielo. El 30% del agua dulce es subterránea, la mayoría de ella en acuíferos profundos y difíciles de alcanzar. Los lagos y los ríos juntos contienen sólo un poco más del 0,25% de toda el agua dulce donde los lagos contienen la mayor parte de ella.

En los últimos años, la realidad de los recursos hídricos en los distintos territorios de Chile, en especial la zona norte, indican una agudización importante de la escasez de éstos. Ante esta situación, muchas comunidades y nuevas iniciativas productivas, tanto de la ciudadanía como de las industrias mineras, han tenido que enfrentar el problema buscando fuentes no convencionales de abastecimiento. En este caso, la desalación de agua de mar surge como una solución a considerar, dada su tecnología fiable y económicamente sostenible para la obtención de agua potable, siendo en muchos lugares la única alternativa disponible.

Es así como la aplicación de energías renovables, como la energía solar para producir agua dulce, está recibiendo mayor interés debido a la necesidad de resolver el problema de escases de agua en este país y en varias partes del mundo.

El agua de mar, por definición, es una solución acuosa en la que se encuentran disueltos una amplia variedad de sólidos (principalmente sales) y gases atmosféricos, sumándose a estos materiales, sólidos suspendidos del tipo orgánico e inorgánico. Junto con los anteriores, forman parte también de esta solución acuosa algunos organismos microscópicos vivos vegetales conocidos como fitoplancton y animales (zooplancton).

Hay varios métodos de desalinización en el mercado que utilizan la energía térmica o mecánica principalmente en sus procesos fundamentales de separación. Entre ellos se encuentra la osmosis inversa (OI) que es muy adecuada para sistemas de pequeña a mediana capacidad y también tiene buenas perspectivas para la reducción de costes y mejora de la eficiencia en el futuro cercano.

La principal problemática de las plantas de OI, está en el alto consumo energético para realizar sus procesos. El principal consumo eléctrico de la planta proviene de la bomba de alta presión que comprime el agua a desalinizar para ser impulsada hacia las membranas.

Estas energías, en forma de trabajo mecánico o energía eléctrica para su funcionamiento, pueden ser generadas con fuentes de energías renovables como la eólica, plantas termoeléctricas o fotovoltaicas de generación eléctrica solar, mareomotriz y hasta energía geotérmica. En este caso, la fuente de energía usada para este proyecto será la termoeléctrica usando colectores solares.

Así, el proyecto constará principalmente de 3 subsistemas: la planta de energía solar, el ciclo Rankine orgánico y la osmosis inversa. La planta de energía solar será la fuente de calor en el ciclo Rankine orgánico, que elevará la temperatura del fluido de trabajo y accionará una turbina para generar el trabajo necesario y suministrarlo a la bomba de alta presión de la osmosis inversa.

Se presentan 3 escenarios a evaluar en donde cambia el tipo de funcionamiento de la planta y las producciones totales de agua dulce. En primer lugar se tiene el caso de funcionamiento de la planta alimentada solamente con energía solar con una producción de agua de 121,5 [m³/día] durante 9 [horas]. El segundo caso, la planta es alimentada con energía solar además de energía proveniente del SING (Sistema interconectado del Norte Grande), con una producción de agua de 235 [m³/día] y durante 18 [horas]. Y, en tercer lugar, se tiene la planta funcionando con energía solar además de energía proveniente del SING, cubriendo la totalidad de horas del día (24 [horas]) con una producción de 324 [m³/día].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Desarrollar estudio técnico sobre la desalinización de agua de mar, usando el ciclo Rankine orgánico alimentado por energía solar y evaluar la rentabilidad económica del proyecto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar los fluidos de trabajos seleccionados para el ciclo Rankine orgánico y elegir el más adecuado energéticamente.
- Determinar el trabajo a generar en la turbina del ciclo Rankine orgánico y dimensionar planta solar de acuerdo a ésta.
- Estudiar las localidades costeras en Chile sobre la radiación solar que reciben por medio del colector solar LS-3.
- Determinar el flujo másico de agua dulce obtenido para 3 escenarios establecidos previamente.
- Realizar un análisis de flujo de caja del proyecto para estudiar la viabilidad económica de los 3 escenarios.

1.3 Antecedentes globales

Los primeros antecedentes de cómo desalinizar agua de mar datan de la antigüedad, de los tiempos de Aristóteles, cuando la desalación por evaporación se comienza a transformar en un proceso conocido. Observando la naturaleza, Aristóteles captó los principios físicos para separar el agua y las sales en los que se basan ciertas tecnologías modernas de la desalación que tienen que ver con el evaporar el agua de mar y después condensar el vapor, obteniendo agua dulce en fase líquida.

En el siglo XVI, los árabes ponen nuevamente a la luz este tema probando otra alternativa: la desalación por destilación, la cual se realiza en varias etapas, en cada una de las cuales una parte del agua salada se evapora y se condensa en agua dulce. Cerca de 300 años después se posiciona como una tecnología de uso relativamente común en barcos y aplicaciones militares y mineras. Sin embargo, la tecnología siguió avanzando y en el siglo XVII, Sir Francis Bacon empieza a experimentar con la desalinización por filtración, la cual consiste en hacer pasar el agua de mar por una serie de filtros cada vez más pequeños para la obtención de agua dulce.

Pero es en el siglo XVIII cuando se plasma uno de los grandes hitos tecnológicos en este campo: la filtración con membranas, reconociéndose también el fenómeno de osmosis a través de membranas naturales. Las primeras aplicaciones de este novedoso sistema se desarrollarían en el siglo siguiente.

Según antecedentes de la Asociación Internacional de Desalinización, la primera planta desalinizadora que operó en el continente americano fue la de Key West, en el estado de Florida, EEUU. en 1861. Producía 27 m³/día por destilación en un solo efecto. A esa altura ya se conocía y aplicaba otra tecnología en ese rubro, denominada evaporación multi-efecto, patentada en 1840 para la industria del azúcar y utilizada extensivamente antes del término del siglo XIX.

Posteriormente, ya en el siglo XX, en la década de 1960, investigadores de EEUU. y Japón principalmente, desarrollaron membranas semipermeables con fines industriales las que pronto comenzaron a ser usadas para la desalación por osmosis inversa. Así, ya en el año 1970, los promotores de plantas desaladoras adoptaron la osmosis inversa como técnica preferente.

Actualmente más de 150 países en el mundo emplean la desalación de agua de mar para solventar sus necesidades. Entre los países que más utilizan esta tecnología destacan Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos, España, Kuwait, Argelia, China, Qatar, Japón y Australia.

Tabla 1.1 Ranking mundial de los diez países con mayor capacidad para desalar agua

Países	Capacidad (m³/día)	Porcentaje de la producción mundial
Arabia Saudita	10.598.000	17
Emiratos Árabes Unidos	8.743.000	14
Estados Unidos	8.344.000	14
España	5.428.000	9
China	2.553.000	4
Kuwait	2.390.000	4
Qatar	2.049.000	3
Argelia	1.826.000	3
Australia	1.508.000	2
Japón	1.153.000	2

Fuente: Guido Soto Álvarez, Manuel Soto Benavides. 2013

De todos los países que emplean la desalación como una fuente de recursos hídricos, el Medio Oriente lidera los primeros puestos en cuanto a capacidad de producción, seguido muy de cerca por Estados Unidos y España.

El uso de las tecnologías de desalación, para producir un suministro fiable de agua dulce, ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Estas tecnologías se han empleado de forma creciente para hacer frente a la gran escasez mundial y a la búsqueda de nuevas fuentes de agua dulce. Cabe recordar que, según datos de la Organización Mundial de la Salud, se estima que el 11% de la población mundial no tiene acceso al agua potable, y aproximadamente el 20% de la población del mundo vive en países donde el agua es escasa y en donde las personas no han sido capaces de acceder a los recursos disponibles.

1.4 Antecedentes en Chile

Según la Asociación Internacional de Desalinización, Chile fue un país pionero en el empleo de la desalinización, en todas las formas a partir del siglo XIX. De hecho, en la Guerra del Pacífico, el ejército de Chile ocupó las llamadas resecadoras para abastecer a sus tropas de agua potable. Así mismo, otras formas de obtener agua limpia fue una planta de destilación solar de una explotación minera: las Salinas de Chile, en donde se logró realizar el proceso de purificación del agua. Su rendimiento fue de baja escala (20 m^3 producidos en una extensión de 4000 m^2), pero era la primera forma de obtener agua dulce para el abastecimiento de la población minera en un lugar remoto y árido, como lo es el norte de Chile.

Actualmente, a nivel de grandes ciudades, Antofagasta, Taltal y Arica cuentan con plantas desaladoras para abastecer a parte de sus habitantes del vital elemento. En la capital de la Región de Arica y Parinacota, una empresa privada, Agua del Altiplano, procesa agua de pozos subterráneos y su alcance es limitado, por lo que se proyecta la construcción de una instalación mucho mayor, con aportes del Estado, que permitirá asegurar la entrega del recurso a toda la zona. En Antofagasta, ciudad capital de la Región de Antofagasta, también se levantará una segunda planta, adicional a la que ya existe, que cubra la demanda del 40% de la población que actualmente aún no se abastece con agua desalada, y que también provea a la cercana ciudad de Tocopilla.

Por su parte, algunos de los sistemas de agua potable rural cuentan, desde el año 1998, con esta tecnología. La primera planta de osmosis inversa sobre agua potable rural fue instalada en San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Actualmente existen 18 plantas instaladas con esta tecnología, ubicadas en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Aysén.

A estas experiencias se agregan los múltiples proyectos que desarrolla la industria minera para instalar plantas desaladoras para provisión de agua industrial para sus faenas. Ejemplo de esto es lo que ocurre con la planta que Minera Escondida opera en el sector de puerto Coloso, en la Región de Antofagasta, donde la compañía pretende ampliar su infraestructura y capacidad para poder cubrir la demanda de agua en su proyecto de Lixiviación de Sulfuros. En cuanto a proyectos en desarrollo, hay iniciativas similares para Minera Candelaria, la división Mantoverde de Anglo American y Minera Doña Inés de Collahuasi cerca de Iquique. También con el objetivo de contribuir a suplir las necesidades hídricas de procesos productivos propios y externos, el Grupo CAP y Aguas Barcelona (Agbar), además de Minera El Morro de Goldcorp, avanzan en plantas de inversión del mismo tipo en la Región de Atacama.

Respecto a iniciativas en la Región de Coquimbo, existen 11 Comités de Agua Potable Rural que cuentan con plantas desaladoras: Cerrillos de Tamaya, San Julián, El Trapiche, Barraza, Porvenir, Tabalí, Barraza Alto-Socos, Alcones Bajos, Chungungo, Puerto Aldea y Caleta de Hornos. De éstas, tres sistemas desalan agua de mar o provenientes de pozos cercanos a la costa, y el resto tiene, como fuente, aguas salobres provenientes de pozos en áreas interiores de la Región.

Ahora, hablando plenamente de plantas desaladoras mediante osmosis inversa con abastecimiento de energía solar, la experiencia en Chile nos señala que la aplicación de estos proyectos es muy limitada. Tanto así que sólo se tiene registro de una iniciativa que ha visto la luz hace unos años (2012), como es el proyecto de Codelco para dotar de agua potable a una comunidad costera de la región de Antofagasta.

Esta iniciativa favorece a más de 30 familias de pescadores artesanales de la localidad de Hornitos, ubicada en la Comuna de Mejillones, los cuales se verán beneficiados con la construcción de la “Planta de tratamiento de agua de mar”, desarrollada con el fin de generar agua potable en esa zona. La iniciativa, que ha demandado una inversión de US\$ 300 mil, operará con energía solar y permitirá purificar diariamente 6 m³ del recurso. Desde la perspectiva técnica es una planta de desalinización autónoma y modular, que utiliza energía solar y agua de mar para su funcionamiento por osmosis inversa de alta presión, con nueve membranas que son capaces de purificar un metro cúbico por hora y funciona alimentada por celdas fotovoltaicas y un generador de respaldo.

CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA

La instalación del sistema de desalación de agua de mar, usando como fuente de calor la energía solar, consta de tres subsistemas principales y conectados entre sí: el ciclo Rankine orgánico, sistema de osmosis inversa y la planta solar. Todos ellos quedan expuestos en la figura 2.1 que muestra cómo se conectan entre ellos:

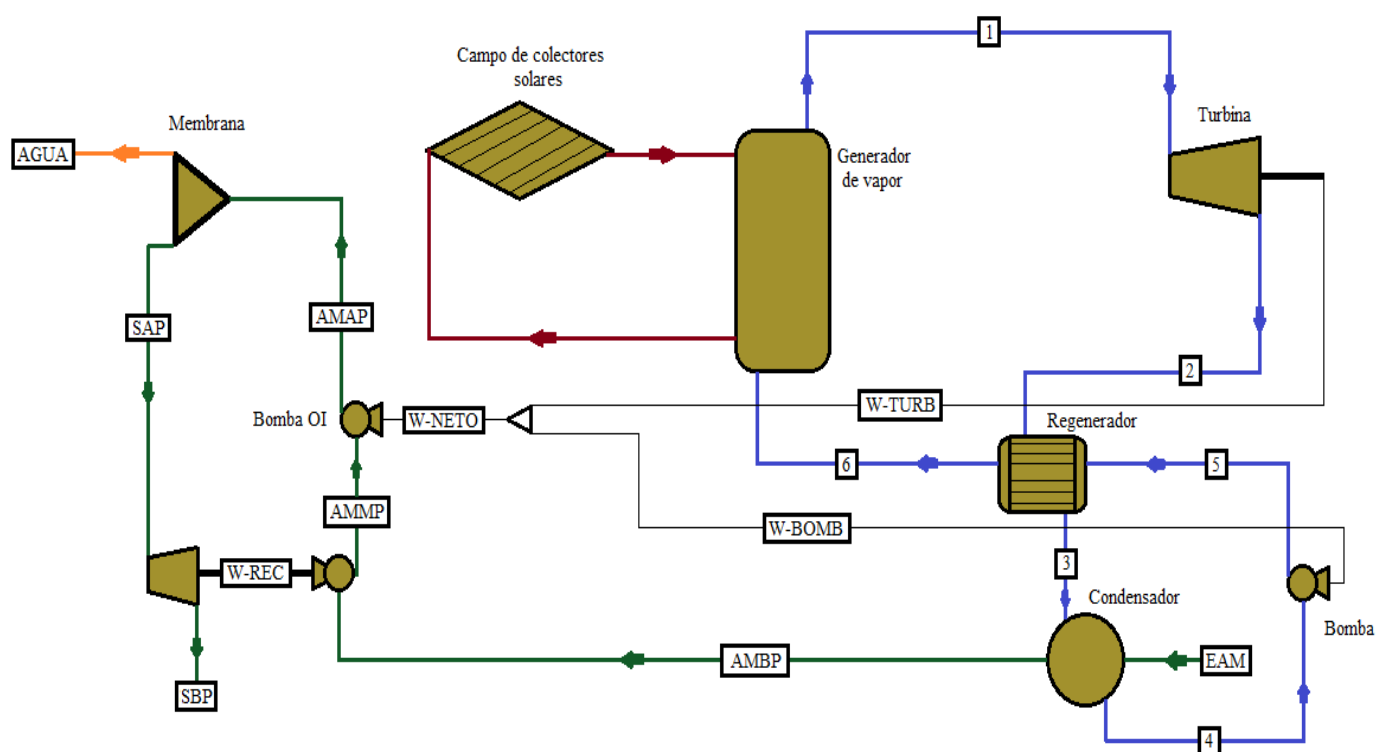


Figura 2.1: Esquema representativo de la planta desalinizadora y sus demás sistemas

El sistema de ciclo Rankine orgánico es un ciclo de energía termodinámica que utiliza un fluido de trabajo orgánico o aceite orgánico en lugar de agua, comúnmente usada en un ciclo Rankine, y es conocido por producir un excelente rendimiento a temperaturas de hasta 400°C. El fluido de trabajo se calienta en el Generador de vapor y se usa para accionar una Turbina y más generalmente cualquier tipo de expansor. Esta turbina proporciona toda la energía mecánica requerida para accionar la Bomba OI de alta presión. En este caso, por tratarse de un ciclo de baja potencia, se considerará el gasto de trabajo de la bomba presente en el ciclo. En las aplicaciones convencionales, el trabajo de la turbina es usado comúnmente para impulsar un generador y producir energía eléctrica.

En este proceso, después de la expansión del vapor, el fluido de trabajo se condensa mediante la alimentación de agua de mar (EAM) para el sistema de osmosis inversa, donde es calentada previamente para, a su vez, aumentar el rendimiento de dicho ciclo. El fluido de trabajo de CRO se condensa para volver al ciclo y producir nuevamente el trabajo.

El calor requerido para la generación de vapor del fluido de trabajo en CRO se obtiene en este caso a partir de una planta solar térmica, con su sistema de colectores solares, utilizando agua o un aceite térmico como fluido de transferencia de calor, dependiendo de las condiciones de trabajo como se describe en las secciones siguientes.

La generación de agua limpia de sales se produce en las membranas a las cuales llega el agua de mar con alta presión (AMAP). De las membranas es donde sale aproximadamente entre el 40 y 45% de agua dulce, mientras que aproximadamente el 55 y 60% es de agua con alto contenido de sales.

La planta de osmosis inversa cuenta con una recuperación de energía, debido a que el agua de mar que resulta como desecho en las membranas, contiene gran cantidad de sal y viene con alta presión. Esta salmuera (SAP) logra accionar una turbina de baja potencia que alimenta a una bomba intermedia, la cual eleva la presión del agua de mar entrante a una presión media (AMMP).

Todos los sistemas que componen la instalación de desalación son detallados en las siguientes secciones a fin de proporcionar todos los detalles de funcionamiento de ésta.

2.1 Ciclo Rankine orgánico solar simple

En el ciclo Rankine orgánico solar simple un captador solar térmico transforma en su receptor la energía de la radiación solar que llega a su apertura en energía térmica que es cedida al fluido de trabajo en el proceso de calentamiento. La transferencia de la energía térmica al fluido de trabajo del ciclo puede realizarse de la siguiente forma:

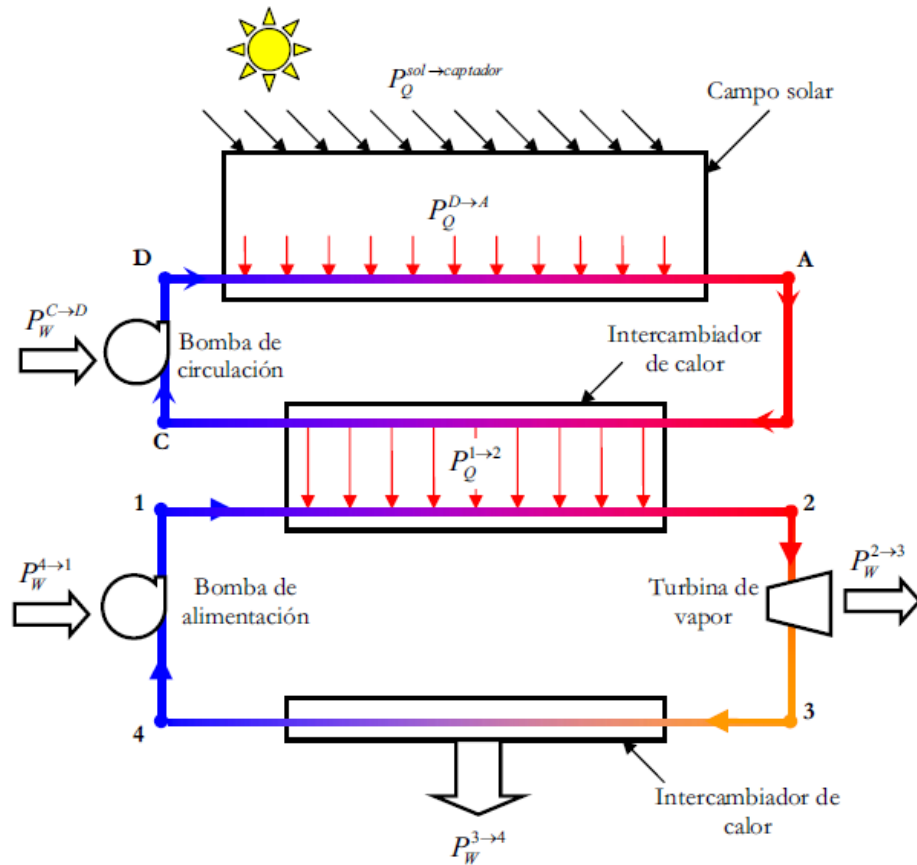


Figura 2.2: Flujos y transferencia de energías en un ciclo Rankine orgánico solar simple

Esto es, parte de la energía adquirida en forma de calor por el fluido portador en el captador es transferida mediante un intercambiador de calor al fluido de trabajo que experimenta el ciclo termodinámico de Rankine. A esta configuración se le suele denominar fluido de transferencia de calor y su esquema básico se muestra en la figura 2.2. Como se observa, en esta configuración el circuito de captación es diferente al circuito del propio ciclo termodinámico de Rankine.

El ciclo ACD corresponde al fluido de los colectores solares, el cual tiene una bomba de circulación y el intercambiador de calor para calentar el fluido en el CRO. Luego, el ciclo 1234 corresponde al fluido del CRO y tiene la turbina de vapor, para generar el trabajo, un intercambiador de calor, para condensar el fluido, y por último se tiene la bomba de alimentación, para aumentar la presión del fluido.

CAPITULO 3: CICLO RANKINE ORGÁNICO

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que operase entre los mismos focos térmicos. El ciclo de Rankine utiliza un fluido de trabajo que evapora y condensa de manera alternada, siendo típicamente agua. Sin embargo existen otros tipos de sustancias que pueden ser utilizadas, como los aceites térmicos de menor temperatura, pasándose a llamar ciclo Rankine orgánico.

El ciclo Rankine orgánico (CRO) es una tecnología comercial para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía de bajo/medio nivel de temperaturas. Además se puede aprovechar el calor de condensación para aplicaciones como climatización, agua caliente sanitaria, etc.

Como se menciona anteriormente, es similar al ciclo Rankine convencional de agua, a excepción del fluido empleado, el cual es un aceite orgánico de elevado peso molecular, como por ejemplo hidrocarburos como isopentano, isooctano, tolueno, aceite de silicona, etc. La tecnología de este ciclo con fluido orgánico encuentra entre sus aplicaciones el aprovechamiento de energía solar, energía geotérmica de baja temperatura, energía obtenida a partir de biomasa y la recuperación de calor residual.

El fluido de trabajo orgánico se vaporiza en el generador de vapor al ser calentado por una fuente de calor externa. Cuando está en fase de vapor se expande en la turbina para seguir por el regenerador y aumentar la temperatura del fluido antes de entrar nuevamente al generador de vapor. Luego del regenerador, se condensa en el condensador. La condensación se puede realizar utilizando agua de refrigeración proveniente de las torres de refrigeración o a través de aire. En este caso, el fluido se condensa por medio del uso de agua de mar, que a su vez eleva su temperatura para mejorar los rendimientos. El fluido orgánico condensado se bombea nuevamente hacia el evaporador cerrando de esta forma el ciclo termodinámico.

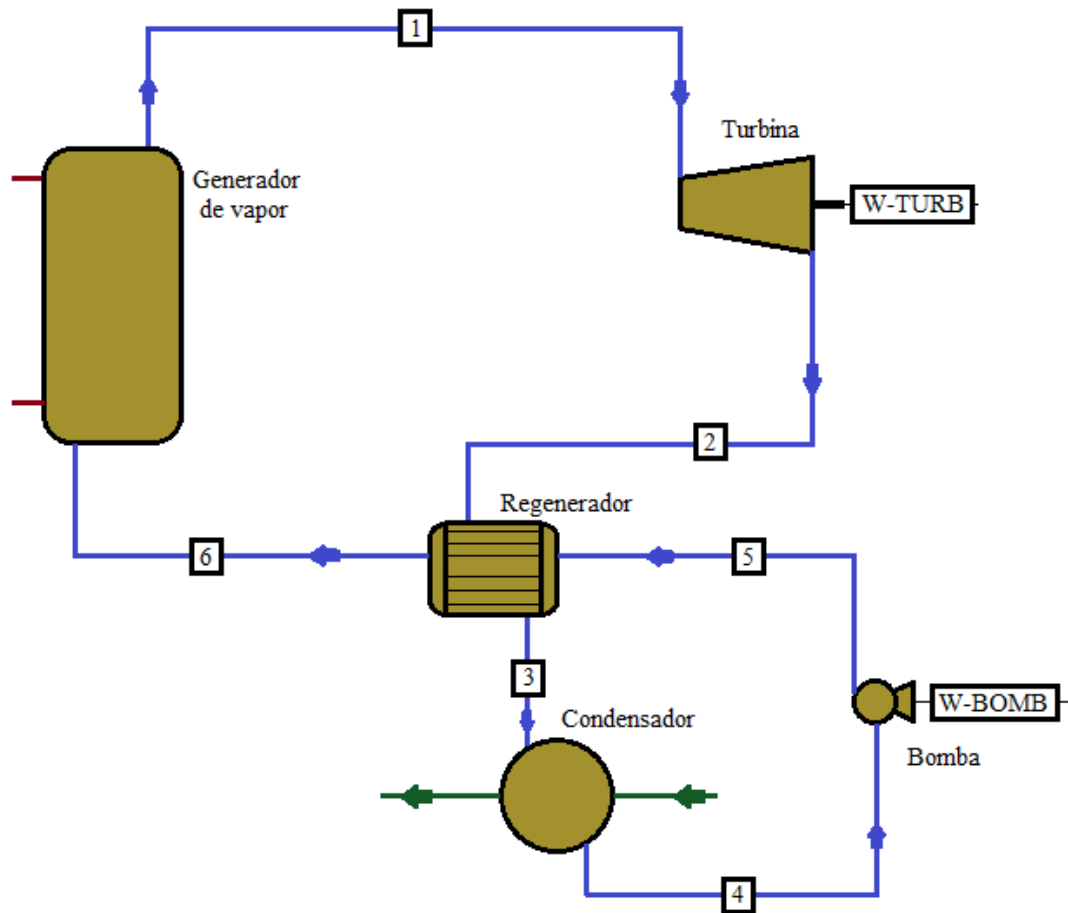


Figura 3.1: Esquema representativo del subsistema ciclo Rankine orgánico

La regeneración consiste en extraer parte del vapor que se expande en la turbina, con el fin de mezclarlo con el agua saliente del condensador y ahorrar así parte de la energía empleada en calentarla. Se consigue por tanto una reducción del calor aportado al fluido en la caldera, a costa de una pequeña reducción del trabajo de expansión producido por la turbina. Así, el rendimiento del ciclo experimenta un aumento.

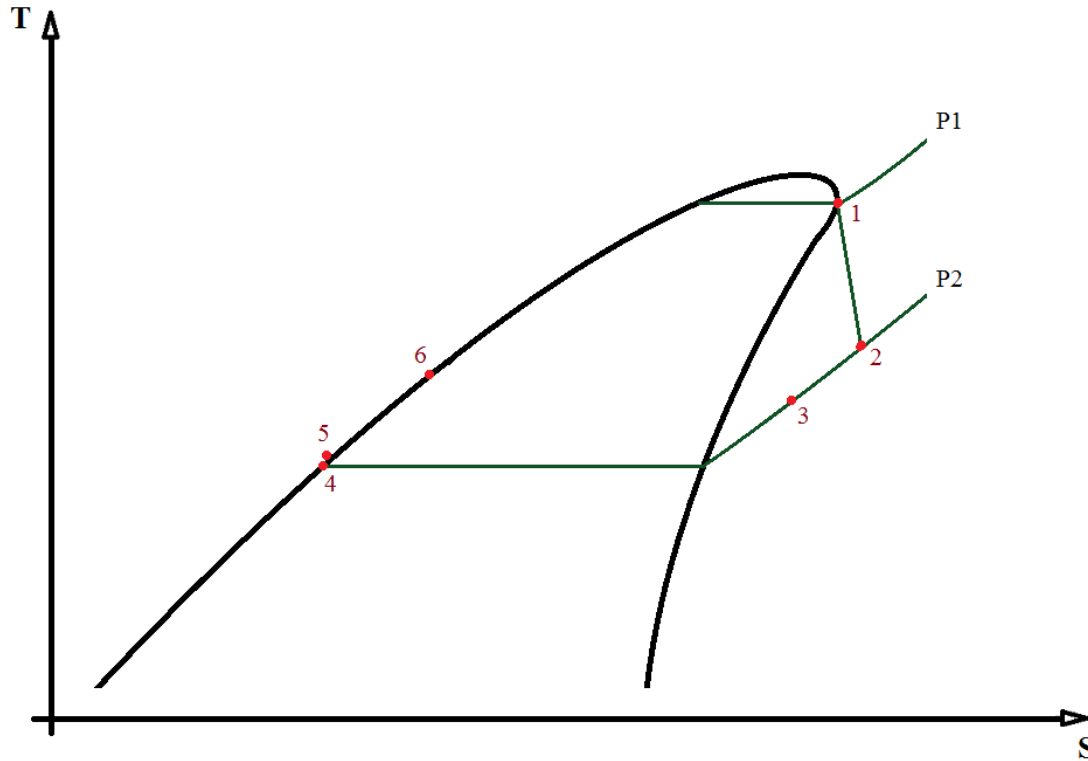


Figura 3.2: Diagrama T-s del subsistema ciclo Rankine orgánico

El diagrama T-s del ciclo Rankine orgánico está formado por 6 procesos: dos isentrópicos y cuatro isobáricos. La bomba y la turbina operan según procesos isentrópicos, mientras que la caldera, el regenerador y el condensador operan sin pérdidas de carga y por lo tanto sin caídas de presión.

- Proceso 1-2: expansión isentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera (P_1) hasta la presión del condensador (P_2). La turbina genera la potencia en el eje de la misma.
- Proceso 2-3: el vapor pasa a través del regenerador disminuyendo su temperatura a presión constante (P_2) y precalentando el fluido orgánico antes de su entrada al generador de vapor.
- Proceso 3-4: el fluido orgánico se condensa a presión constante, de forma que el fluido alcanza el estado de líquido saturado.
- Proceso 4-5: compresión isentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia, para ser llevada hasta la presión de la caldera (P_1).
- Proceso 5-6: el fluido de trabajo pasa por el regenerador a presión constante, con el fin de precalentarse antes de entrar al generador de vapor y aumentar así el rendimiento del ciclo.

Dentro de las ventajas que son posibles de apreciar en el ciclo Rankine orgánico están:

- Los módulos CRO se pueden integrar relativamente fácil en plantas de biomasa existentes.
- El riesgo de averías en el caso de tuberías de baja velocidad es inferior.
- Debido a las propiedades del medio CRO el riesgo de corrosión en el ciclo es muy bajo.
- El fluido de trabajo no se descompone ni es corrosivo.
- Las instalaciones de CRO trabajan relativamente sin ruido.
- El CRO es un ciclo cerrado por lo cual una pérdida del fluido de trabajo solamente se puede producir en caso de avería.
- Los módulos CRO se caracterizan por una excelente capacidad para el servicio con carga parcial.
- El CRO ha alcanzado la madurez tecnológica.
- La tecnología CRO se caracteriza por un alto grado de automatización.
- Los costes de mantenimiento son inferiores.
- La utilización de un ciclo con aceite térmico no precisa fogonero.

3.1 Ecuaciones y variables del proceso

Las ecuaciones que se presentan a continuación son las necesarias para calcular el rendimiento total del ciclo Rankine orgánico para los distintos fluidos de trabajo empleados. Cabe destacar que para cada fluido de trabajo existen presiones y temperaturas diferentes en cada punto del ciclo, esto con el fin de sacarle el máximo provecho al fluido y por ende buscar el mayor rendimiento con éstos.

$$Q_{cs} = m \cdot (h_1 - h_6) \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$W_{turb} = m \cdot (h_1 - h_2) \quad \text{Ec.3.2}$$

$$W_{bomb} = m \cdot (h_5 - h_4) \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{turb} - W_{bomb}}{Q_{cs}} \quad \text{Ec.3.4}$$

donde:

Q_{cs} : es el calor cedido al fluido de trabajo desde los colectores solares en el generador de vapor [kW]

W_{turb} : es el trabajo generado en la turbina por el vapor [kW]

W_{bomb} : es el trabajo que realiza la bomba al aumentar la presión del fluido de trabajo a la de funcionamiento en la caldera [kW]

η_{ciclo} : es el rendimiento del ciclo Rankine orgánico [%]

m : es la masa de fluido de trabajo que circula por el ciclo [kg/s]

h_1 h_2 h_3 h_4 h_5 h_6 : son las entalpías específicas del fluido de trabajo en los puntos indicados [kJ/kg]

Dentro de los equipos que son posibles encontrar en el ciclo Rankine orgánico están presentes:

- Generador de vapor: intercambiador de calor que le entrega el calor necesario al fluido de trabajo en CRO desde los colectores solares.
- Turbina: es un expansor de fluidos que tiene como fin transformar la energía de éste en trabajo útil.
- Regenerador: es un intercambiador de calor que tiene como función principal precalentar el fluido de trabajo antes de ingresar al generador de vapor
- Condensador: es un intercambiador de calor que reduce la temperatura del fluido de trabajo hasta llevarlo al estado de líquido.
- Bomba: tiene como función comprimir el fluido de trabajo hasta la presión de funcionamiento de la caldera.

3.2 Fluidos de trabajo

3.2.1 Características deseables

Dentro de las características deseables que debe poseer el fluido de trabajo, en un sistema basado en ciclo Rankine orgánico, son la obtención del mayor rendimiento posible, una operación segura del ciclo y el menor coste para su funcionamiento. Esto está condicionado al tipo de fuente de calor que vaya a suministrar la energía al ciclo, es decir, si es una fuente de baja, media o alta temperatura. Dentro de lo ideal, el fluido de trabajo debe poseer las siguientes características:

- Propiedades termodinámicas que maximicen el rendimiento del ciclo. De éstas, se encuentra una capacidad térmica isóbara baja en la región de líquido comprimido o subenfriado, de modo que el proceso de absorción de calor en el ciclo se produzca en su mayor parte de forma isoterma.
- Volúmenes específicos bajos a lo largo de todo el ciclo para evitar tamaños excesivamente grandes de los equipos del ciclo, ya sea la bomba, turbina de vapor e intercambiadores de calor.
- Una curva de equilibrio líquido – vapor
 - Que dé lugar a presiones de calentamiento moderadas. Esto es importante por temas de seguridad y de economía, pues así se evitan costes de inversión elevada para algunos equipos.
 - Que dé lugar a presiones de condensación superiores a la presión atmosférica para evitar así posibles entradas de aire al sistema.
 - Que asegure la fase líquida del fluido en condiciones ambientales, para facilitar su manejo y almacenamiento.
- Una curva de equilibrio sólido – líquido tal que no se produzca la congelación del fluido cuando se alcance la temperatura más baja de operación en el sistema.
- Estabilidad térmica asegurada en las condiciones de operación de máxima temperatura.
- Que posea buenas propiedades de transporte, como alta conductividad térmica, baja viscosidad y tensión superficial.
- Baja o nula toxicidad, inflamabilidad y poder corrosivo. Revisar la compatibilidad entre el fluido y los materiales de uso habitual que componen el sistema para evitar la utilización de materiales costosos.

- Bajo costo y de fácil disponibilidad.

No existe una sustancia que cumpla con todos los requisitos enumerados anteriormente. El agua es el fluido normalmente utilizado en los ciclos de potencia debido a que es barata y abundante, aunque tiene una temperatura crítica baja, una presión crítica alta y una baja presión de vapor a la temperatura de condensación y, además, tiene una alta capacidad calorífica.

Por último, cuando se trate de realizar estudios preliminares, se destaca la importancia de disponer de una buena caracterización termodinámica y de propiedades de transporte de la sustancia.

3.2.2 Selección previa de sustancias

El número de sustancias puras existentes que pueden actuar como posibles fluidos de trabajo, en un ciclo Rankine orgánico, es enorme, lo que impide afirmar que un determinado grupo de ellas represente la mejor selección posible, sin haberse explorado su totalidad. Lo anterior, justifica que, en este estudio, con el análisis comparativo de sustancias no se pretende determinar de forma absoluta cuál es el mejor fluido de trabajo. A partir de lo anterior, el conjunto de sustancias puras a considerar en esta investigación están seleccionadas en base a los siguientes aspectos:

1. Referencias existentes en la bibliografía en las que se haya considerado a dichas sustancias como posibles fluidos de trabajo del ciclo Rankine, preferentemente para su aplicación con energía solar. De esta forma, se tendrá el respaldo de propuestas realizadas con anterioridad.
2. Valores de sus parámetros críticos (temperatura y presión), pues este aspecto está relacionado con la máxima temperatura alcanzable en el ciclo, que a su vez está condicionado por la tecnología del captador solar que se utilice.
3. Posibilidad del futuro uso de las sustancias, de acuerdo con la normativa actual sobre sustancias ya retiradas o en vías de desaparición, como consecuencia de su negativo impacto ambiental.
4. Seguridad y toxicidad.
5. Disponibilidad de una buena caracterización termodinámica, lo que dará mayor fiabilidad a los resultados e interpretación.

Bajo estos criterios se realiza la preselección de los fluidos de trabajo en un ciclo Rankine orgánico, donde se garantiza, al menos, que estas sustancias sean relativamente apropiadas para su uso en un sistema de fuente de energía solar.

Así, los fluidos escogidos bajo los criterios anteriores, para su análisis comparativo como fluidos de trabajo de ciclo Rankine solar, son: isobutano, butano, isopentano, pentano, hexano, heptano, ciclohexano, octano y tolueno.

3.2.3 Presentación de los fluidos seleccionados

Los datos más relevantes en las sustancias seleccionadas para el análisis dentro del ciclo Rankine orgánico, en base a condiciones normales de presión y temperatura, son: la presión y temperatura crítica, puntos normales de fusión y ebullición, los cuales son presentados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos relevantes de los fluidos de trabajo a estudiar en CRO

Nombre fluido	P. crítica [kPa]	T. crítica [°C]	Pto. normal ebul. (°C)	Pto. normal fusión (°C)
Isobutano	3629	134,66	-11,75	-159,6
Butano	3796	151,98	-0,49	-138,0
Isopentano	3396	187,20	27,82	-160,0
Pentano	3370	196,60	36,06	-130,0
Hexano	3034	234,67	68,71	-95,0
Heptano	2736	266,98	98,38	-91,0
Ciclohexano	4075	280,49	80,74	7,0
Octano	2497	296,17	125,62	-57,0
Tolueno	4126	318,60	110,60	-95,0

Fuente: <http://webbook.nist.gov/chemistry>

Se puede observar que se cumplen los puntos mencionados con anterioridad sobre las características deseables de los fluidos de trabajo para un CRO. En todos los casos, la presión crítica de dichas sustancias se encuentra por debajo de los 4200 kPa, lo cual corresponde a una presión moderada. Así mismo, suponiendo una temperatura y presión ambiental de 19°C y 101,325 kPa, todos los fluidos se encontrarían en fase líquida, permitiendo un fácil manejo y almacenamiento de éstos, a excepción del isobutano y butano que se encontrarían en estado gaseoso. Además, a excepción del ciclohexano, todos los fluidos presentan un punto de congelación por debajo de los -50°C, lo cual es muy por debajo de la mínima temperatura alcanzada en el ciclo.

3.2.4 Seguridad y toxicidad

Como se menciona anteriormente, éste es un punto muy importante debido a la alta peligrosidad que presentan los fluidos de trabajo ante cualquier accidente sobre los trabajadores cercanos. Es por ello que, en esta sección, se identifican las características de peligrosidad de las sustancias previamente seleccionadas.

Se indican tres puntos importantes para cada una de las sustancias: el Valor Límite Umbral (Threshold Limit Value, TLV) en su forma de Media Ponderada en el Tiempo (Time Weighted Average, TWA), la temperatura de autoignición y los límites de explosividad.

El TLV-TWA de una sustancia es un índice publicado por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, AGGIH), el cual lo define como la concentración media ponderada en el tiempo de dicha sustancia a la que pueden estar expuestos todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos (considerada una jornada normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas). En segundo lugar, se tiene la temperatura de autoignición que es la temperatura a la cual, a presión atmosférica, una sustancia alcanza la energía de activación suficiente para que se inicie la reacción de combustión, sin necesidad de una fuente de ignición. Y por último, se presentan los límites de explosividad de una sustancia, los cuales delimitan el intervalo de concentraciones de vapor de ésta en el aire, dentro del cual puede tener lugar la propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de ignición.

En la tabla 3.2 se presentan los valores correspondientes a los 3 puntos explicados con anterioridad, sobre todos los fluidos preseleccionados, los cuales fueron obtenidos de las Fichas Internacionales de Seguridad Química disponibles en la web de la Organización Internacional del Trabajo:

Tabla 3.2: Índices de seguridad y toxicidad de los fluidos de trabajo en CRO

Nombre fluido	TLV-TWA (ppm)	T. autoignición (°C)	Lim. explosividad (% en vol. en el aire)
Isobutano	1000	460	1,8-8,4
Butano	800	287	1,8-8,4
Isopentano	no establecido	420	1,4-7,6
Pentano	600	309	1,5-7,8
Hexano	50	225	1,1-7,5

Heptano	400	215	1,1-6,7
Ciclohexano	100	260	1,3-8,4
Octano	300	220	1,0-6,5
Tolueno	50	480	1,1-7,1

Fuente: Fichas Internacionales de Seguridad Química

Se puede observar de la tabla 3.2 que los valores de TLV-TWA son reducidos el hexano y tolueno, lo que los hace más tóxicos que los restantes. A pesar de eso, el tolueno presenta una temperatura de autoignición que se aleja bastante de su máxima temperatura alcanzada en el ciclo, no así el hexano. Sobre la temperatura de autoignición, los fluidos octano, ciclohexano, heptano y hexano alcanzan mayores temperaturas en el ciclo, lo cual es altamente riesgoso. Los restantes fluidos presentan sus temperaturas de autoignición mayores a las temperaturas alcanzadas en el ciclo. En cuanto a los límites de explosividad, todos los fluidos presentan índices similares.

3.3 Cálculos de los fluidos de trabajo en CRO

Al realizar los cálculos de rendimientos, potencia generada y calor absorbido en el ciclo es necesario conocer algunos valores de entrada de éste los cuales se muestran en la tabla 3.3. Para obtener las presiones óptimas de funcionamiento y, a modo de comparación entre fluidos, se realiza el análisis con el criterio de ciclo saturado.

Tabla 3.3: Valores de entrada necesarios para realizar los cálculos en CRO

Equipo	Parámetro	Valor
Turbina	Presión de descarga (pto. 2)	P_2
	Rendimiento isentrópico (pto. 2)	80 %
Regenerador	Calidad de salida (pto. 3)	1
Condensador	Temperatura de salida (pto. 4)	T_4
Bomba CRO	Presión de descarga (pto. 5, 6 y 1)	P_1
	Rendimiento	80 %
Generador de vapor	Calidad de salida (pto.1)	1 (vap. saturado)

Fuente: Joan Carles Bruno et al. 2007

Las presiones y temperaturas de operación para cada fluido varían entre cada uno y serán utilizadas directamente para obtener los valores de las entalpías en cada punto del CRO. Estos valores de entalpías fueron obtenidos mediante una simulación en el programa EES (Engineering Equation Solver) en base a la presión y temperatura de su punto correspondiente en el ciclo. Teniendo el valor de las entalpías en cada punto, se hace uso de las fórmulas planteadas con anterioridad en la sección 3.1 donde se obtienen los parámetros de mayor importancia como los rendimientos y calores transferidos.

A continuación se presenta la tabla 3.4 con dichas presiones y temperatura para cada fluido de trabajo en CRO:

Tabla 3.4: Presión y temperatura para los fluidos de trabajo en cada punto del CRO

Fluido de trabajo	1		2		3	4	5	6
	T °C	P kPa	T °C	P kPa	T °C	T °C	T °C	T °C
Isobutano	127,1	3200	47,4	400	30	25	27,1	40
Butano	145,4	3400	62	400	42,1	37,1	39,3	54
Isopentano	179,7	3000	96,8	100	26,8	21,8	23,4	70,3
Pentano	188,7	3000	94,4	100	35,9	30,9	32,5	77,5
Hexano	230	2800	127,7	30	34,4	29,4	30,6	105,1
Heptano	260,6	2500	155,7	7,5	28,7	23,7	24,6	128,7
Ciclohexano	269	3500	145	20	34,6	29,6	31,2	120
Octano	289,9	2300	195,1	7,5	52,2	47,2	48	167
Tolueno	305	3500	156,8	7,5	39,5	34,5	35,6	125,6

Fuente: Elaboración propia

Como se observa desde la tabla 3.4 ninguno de los valores máximos, ya sea de presión y temperatura, sobrepasan a sus correspondientes valores críticos. En el punto 1 del ciclo es donde se maximizan dichos valores para así también, maximizar el trabajo generado por la turbina. También se observa que luego de pasar por el condensador, en el punto 4, con su presión y temperatura (P_2 y T_4), todos los fluidos de trabajo se encontrarían en fase líquida para luego ser comprimidos a la presión de funcionamiento del generador de vapor, P_1 .

Tabla 3.5: Valores de entalpías de los fluidos de trabajo en cada punto del CRO

Fluido de trabajo	Entalpia 1	Entalpia 2	Entalpia 3	Entalpia 4	Entalpia 5	Entalpia 6
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
Isobutano	684	627,9	595,4	259,6	266,2	298,1
Butano	744	683,4	644,5	289,2	296,4	333,7
Isopentano	202,4	127,5	-1,5	-357,3	-351,2	-240,2
Pentano	584,3	491	381,3	11,7	17,8	128
Hexano	676,5	555,1	375,4	10,3	15,3	194
Heptano	764,8	618,8	371,3	-3	1,3	256,7
Ciclohexano	766,5	613,6	436,1	40,8	46,6	233,7
Octano	837	708,2	410,7	50,3	54,2	358,9
Tolueno	603,2	436,6	271,1	-141,9	-137,3	42,5

Fuente: Elaboración propia

Luego, se hace necesario definir un flujo másico para cada fluido de trabajo en CRO. Este flujo másico queda condicionado al calor absorbido en el generador de vapor. Es decir, a mayor cantidad de flujo másico, mayor será la cantidad de calor absorbida por éste, y por ende se necesitará de un campo solar de mayor tamaño que genere dicho calor. Esto significaría un aumento considerable de costos del proyecto. Por lo tanto, el valor final que se le asigne al flujo másico de cada fluido será un valor ajustado a la realidad de presupuesto del proyecto y, por consecuencia, la generación de potencia que se requiera para cada caso.

Por otro lado, se hace necesario definir la cantidad de energía a generar por medio de la turbina, en forma de trabajo mecánico, la cual se establece que sea de 36 [kW]. Este valor se establece a partir de otras investigaciones similares, y queda condicionado principalmente por lo que corresponde la inversión de la planta solar. A medida que aumenta la potencia generada por la turbina, se necesita un calor de absorción mayor para generar el vapor, y por consecuencia, aumenta la inversión de la planta solar de manera significativa.

Por otro lado, para lograr generar 36 [kW] de trabajo mecánico en la turbina (dependiendo del fluido que se utilice), se presentan los siguientes flujos másicos para cada fluido de trabajo en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Flujo másico para los fluidos de trabajo en CRO

Fluido de trabajo	Fluido másico
	kg/s
Isobutano	0,803
Butano	0,743
Isopentano	0,601
Pentano	0,483
Hexano	0,371
Heptano	0,309
Ciclohexano	0,295
Octano	0,35
Tolueno	0,274

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, teniendo todos los datos necesarios para realizar los cálculos y, como se menciona con anterioridad, se utilizan las fórmulas descritas en la sección 3.1. Es decir, los valores del calor absorbido en la generación de vapor, el trabajo de la turbina y de la bomba CRO, y el rendimiento total del ciclo para cada fluido de trabajo, se presentan a continuación:

Tabla 3.7: Parámetros obtenidos de calor absorbido, trabajo en la turbina y bomba, y el rendimiento de los fluidos de trabajo en CRO

Fluido de trabajo	Calor absorbido	Trabajo turbina	Trabajo bomba	Rendimiento
	kW	kW	kW	%
Isobutano	309,88	36,04	4,24	10,26
Butano	304,85	36,02	4,28	10,41
Isopentano	266,00	36,01	2,93	12,44
Pentano	220,39	36,05	2,36	15,29
Hexano	179,01	36,03	1,48	19,30
Heptano	157,00	36,09	1,06	22,31
Ciclohexano	157,18	36,08	1,37	22,09
Octano	167,34	36,06	1,09	20,90
Tolueno	153,63	36,52	1,01	23,11

Fuente: Elaboración propia

La primera impresión que dejan estos resultados de los fluidos de trabajo, es que el tolueno tiene el mayor rendimiento alcanzado en el ciclo, con un 23 %, seguido muy cerca del ciclohexano y heptano, con un 22 %. Por otro lado los rendimientos más bajos son alcanzados por el isobutano y butano, alcanzando sólo un 10 %.

Los valores alcanzados por el trabajo de la bomba en cada caso son relativamente bajos. Sin embargo, los valores del trabajo de la bomba con isobutano, butano, e isopentano son un poco elevados si observamos la generación de potencia por parte de la turbina del ciclo. En dichos casos los valores de trabajo en la bomba serían significativos al trabajo neto del ciclo, no así en los demás fluidos que alcanzan bajos valores.

De forma gráfica, en la figura 3.3 se observa más claramente la comparación entre todos los fluidos empleados en el ciclo. El tolueno es el que presenta mejores resultados, logrando generar hasta 36 [kW] de potencia en la turbina y un trabajo de la bomba casi nulo. En cuanto al calor absorbido en la generación de vapor es el menor de todos, con 153 [kW]. Como se menciona anteriormente, el calor absorbido por la generación de vapor puede ser regulado por el flujo másico en CRO y así no presentaría mayor problemas.

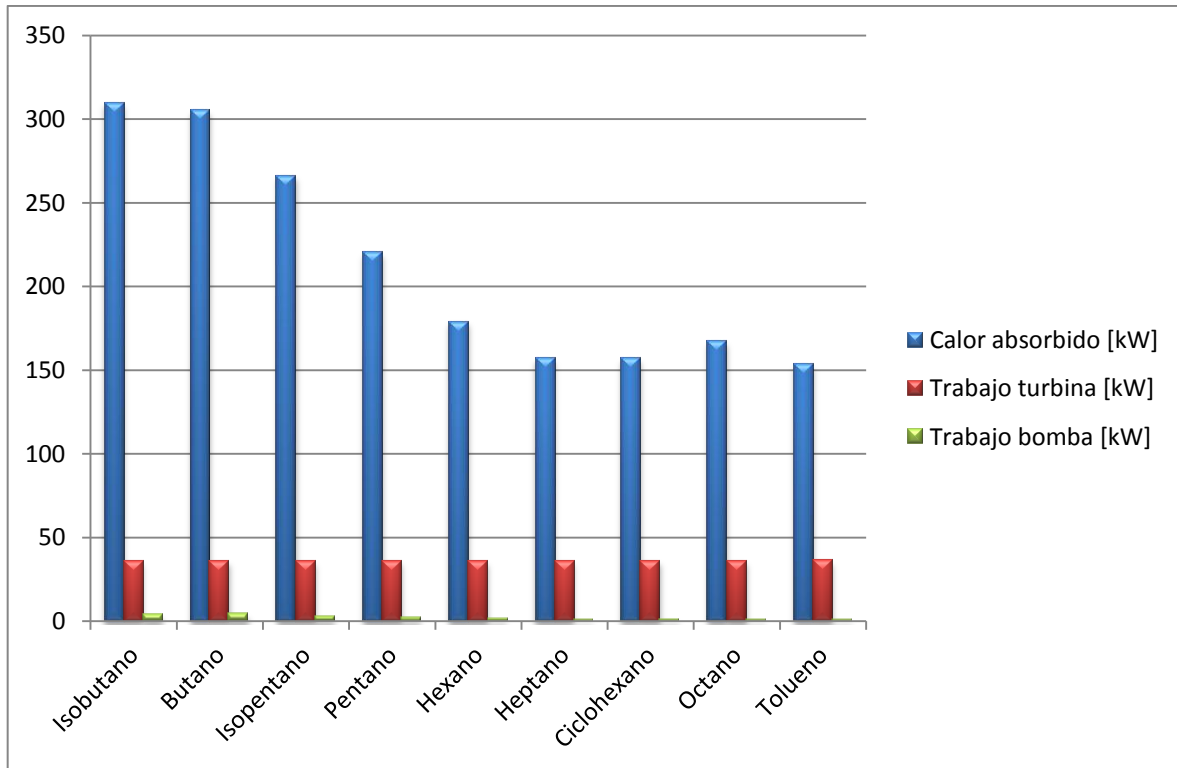


Figura 3.3: Gráfico del comportamiento de los fluidos de trabajo en CRO indicando calor absorbido, trabajo en la turbina y bomba

Al igual que el tolueno, el heptano presenta buenos resultados, logrando generar en la turbina hasta 36 [kW] de potencia, también con un trabajo nulo en la bomba. Además presenta el valor más cercano, en comparación al tolueno, en lo que respecta al calor absorbido en la generación de vapor, con 157 [kW].

Por otro lado, el isobutano y butano son los que presentan menor rendimiento de los fluidos estudiados, a pesar de que igual manera alcanza a generar 36 [kW] de potencia pero con una alta absorción de energía en el generador de vapor, alcanzando valores sobre 302 [kW] lo que le lleva a un bajo rendimiento del ciclo.

El tolueno como fluido de trabajo en CRO, es el fluido óptimo de todos los estudiados y el isobutano el menos adecuado para esto. De este modo, los datos del tolueno serán los utilizados para el análisis de dimensionamiento de la planta solar, para definir el área de apertura necesaria de los colectores.

CAPITULO 4: ENERGÍA SOLAR

Recibe el nombre de energía solar aquella que proviene del aprovechamiento directo de la radiación del sol, y de la cual se obtiene calor y electricidad. El calor se obtiene mediante colectores térmicos, y la electricidad a través de paneles fotovoltaicos o en forma termosolar.

En los sistemas de aprovechamiento térmico el calor recogido en los colectores solares puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades, como por ejemplo: obtención de agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para fines de calefacción, aplicaciones agrícolas, o la generación de electricidad, entre otras.

4.1 Radiación solar

La radiación emitida por el sol es la principal fuente de energía en el sistema terrestre. Si nos ubicamos fuera de la atmósfera terrestre, la radiación que recibimos del sol de manera perpendicular a sus rayos es en promedio 1366 W/m^2 . A esta cantidad se le denomina constante solar.

La energía solar es en parte absorbida, reflejada y dispersada por las nubes, las partículas y las moléculas que componen la atmósfera terrestre. De esta manera, la atmósfera influye en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie del planeta en cada punto y en cada momento. Por lo tanto, para conocer la radiación que alcanza la superficie terrestre, es necesario conocer las características de la atmósfera y su composición en cada lugar del espacio.

Los principales procesos involucrados en la modificación de la radiación que recibe la superficie son la absorción de la radiación, principalmente debido al ozono y al vapor de agua, y la dispersión de la radiación por efecto de las nubes.

A continuación se realiza un análisis sobre la radiación solar que llega a las distintas regiones de Chile, a modo de comparación, para así realizar una correcta selección de una localidad que se adecúe a los propósitos del proyecto en cuestión.



Global Mean Solar Irradiance

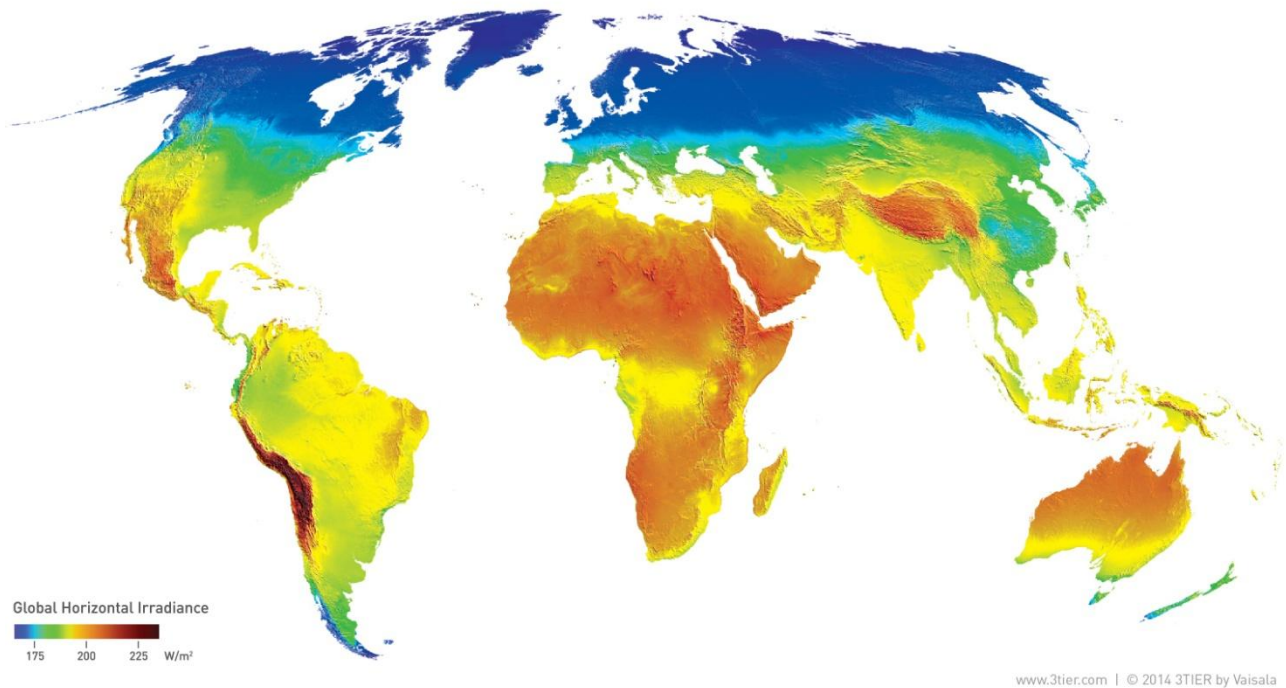


Figura 4.1: Mapa de la radiación solar recibida en todo el mundo

Como se ilustra en la figura 4.1, se puede apreciar que las zonas más apropiadas para la instalación de plantas solares son el suroeste de Estados Unidos, el norte de México, casi la mayoría del continente africano, el norte de Australia y en el sur de Perú y norte de Chile.

En Chile se encuentra la mayor radiación solar en el mundo, lo que lo posiciona como el mejor candidato para las plantas solares a nivel mundial. Pero esta irradiancia depende fuertemente de la región donde se mida dicha variable, como se aprecia en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Principales ciudades en Chile con su respectiva radiación solar promedio anual

Ciudad	kWh/m² año
Calama	2506
San Pedro de Atacama	2466
Diego de Almagro	2429
Antofagasta	2360
Arica	2342
Copiapó	2174
Iquique	2067
Chañaral	2055
Santiago	1843
La Serena	1814
Ovalle	1749
Los Andes	1706
Coquimbo	1701
San Fernando	1657
Curicó	1615
Rancagua	1602

Ciudad	kWh/m² año
Linares	1563
Chillán	1534
Talca	1509
Los Angeles	1498
Concepción	1497
Juan Fernández	1475
Valparaíso	1431
Viña del Mar	1429
Coyaique	1347
Valdivia	1338
Osorno	1271
Puerto Montt	1212
Castro	1163
Aysén	1126
Punta Arenas	872

Fuente: Hernán Romero D. 2008

De las ciudades nombradas en la tabla, cabe destacar que no todas cuentan con acceso al agua de mar, punto que es de mayor importancia al momento de determinar una localidad para una planta desaladora. Por lo tanto, quedan descartadas las ciudades que no cumplan con este punto, debido al alto costo que tendría el impulsar el agua de mar a dichas ciudades. Las ciudades del norte Arica, Iquique y Antofagasta son las más adecuadas en cuanto a la radiación solar que reciben, pero de igual modo se realizará el estudio para las ciudades de La Serena, Valparaíso, Concepción, Valdivia y Puerto Montt.

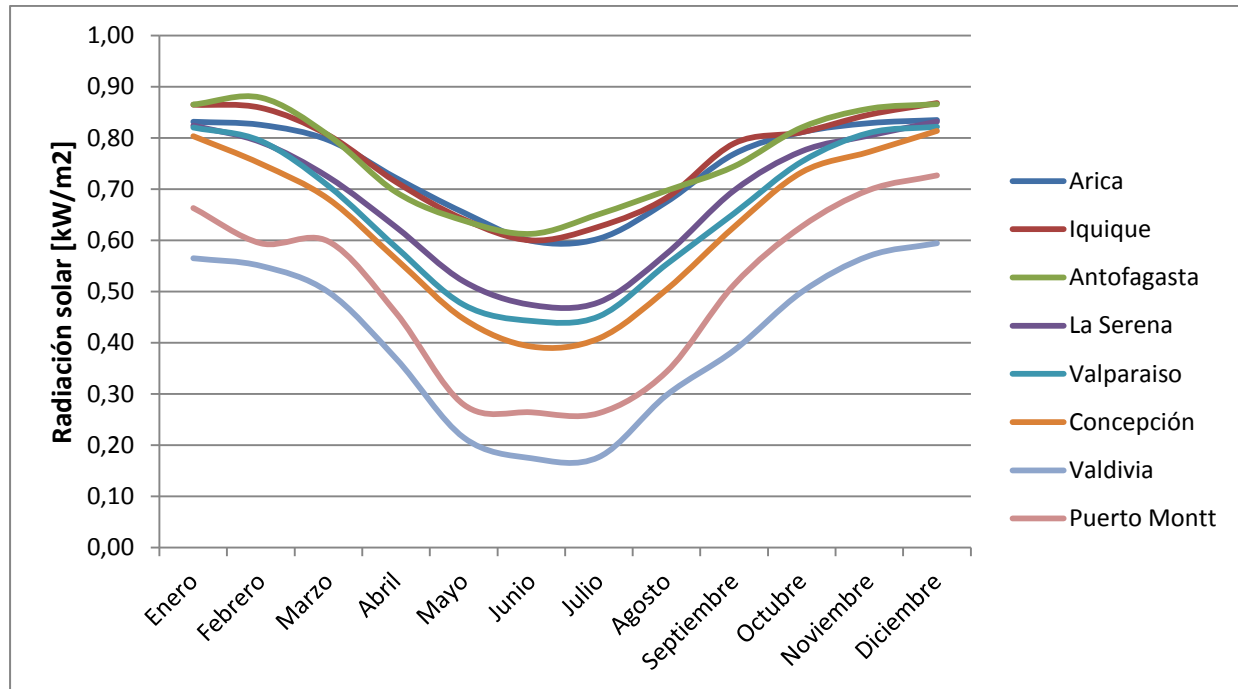


Figura 4.2: Radiación al mediodía solar superficie inclinada para el año 2014

En el gráfico de la figura 4.2, se muestra la radiación al mediodía solar en superficie inclinada para los meses del año 2014 en kW/m^2 , se aprecia de mejor manera la radiación solar para las ciudades propuestas a investigar. Se observa, como se mencionó anteriormente, las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta con la mayor radiación solar, siendo Antofagasta que marca un máximo de $0,88 \text{ kW/m}^2$ para el mes de Febrero; por otro lado, el promedio anual para estas ciudades están en $0,75 \text{ kW/m}^2$ para Arica y $0,76 \text{ kW/m}^2$ para Iquique y Antofagasta. Por el contrario, las ciudades con menor radiación solar son la ciudad de Valdivia seguido de Puerto Montt, siendo Valdivia la que marca un mínimo de $0,17 \text{ kW/m}^2$ para el mes de Junio; por otro lado, el promedio anual para estas ciudades son de $0,41 \text{ kW/m}^2$ para Valdivia y de $0,5 \text{ kW/m}^2$ para Puerto Montt.

La temperatura promedio mensual de una ciudad puede ser tan importante como lo es la radiación sobre ésta, puesto que la temperatura está incluida en la fórmula del cálculo del rendimiento de un panel solar (Ec. 4.1 de los colectores en la sección 4.3). Es por esto que se realiza un análisis similar al de la radiación solar, presentando la figura 4.3.

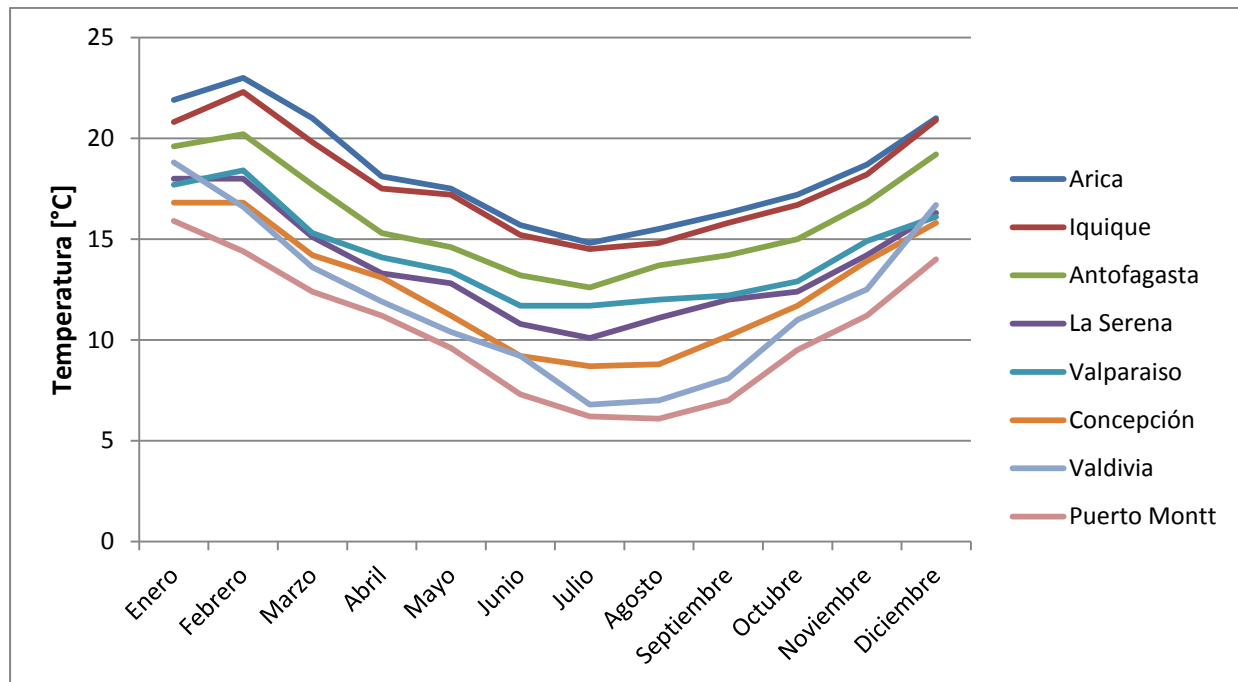


Figura 4.3: Temperatura promedio mensual para el año 2014

Este gráfico de la figura 4.3 detalla las temperaturas promedio mensuales para cada ciudad en el año 2014 en °C (detalladas en el Anexo A), en el cual se puede observar, a grandes rasgos, que las ciudades de Arica e Iquique presentan las mayores temperaturas a lo largo del año, a diferencia de las otras ciudades; de igual manera, la ciudad que presenta menor temperatura promedio mensual es la ciudad de Puerto Montt.

La ciudad de Arica es la que presenta un máximo de temperatura de 23 °C para el mes de Febrero, y le sigue muy de cerca Iquique con un máximo de 22,3 °C. Por el contrario, las temperaturas mínimas alcanzadas en el año 2014 se presentan en Puerto Montt con un valor de 6,1 °C para el mes de Agosto, seguido de Valdivia con 6,8 °C alcanzada en Julio.

Sobre la temperatura promedio anual alcanzada en estas ciudades, se encuentran las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta con 18,4, 17,8 y 16 °C respectivamente, las cuales son adecuadas inclusive en los meses de invierno. Para las ciudades donde se encuentran las menores temperaturas promedio en el año están Puerto Montt, Valdivia y Concepción alcanzando 10,4, 11,8 y 12,5 °C, respectivamente.

4.2 Sistemas de captación solar

Existen muchos tipos de colectores solares térmicos que, aunque tengan el mismo objetivo de utilizar la energía solar, tienen características diferentes y es por ello que se pueden clasificar de muchas formas.

Entre las tecnologías existentes, hay tres que destacan por estar más desarrolladas: los sistemas de colectores cilindro parabólicos (CCP), los sistemas de receptor central (SRC) o de torre central (STC) y los discos parabólicos (DP) o paraboloides de revolución. También existen los sistemas de concentradores parabólicos compuestos (CPC), que a pesar de no estar ampliamente desarrollados en cuanto a tecnología se refiere, merecen una mención. Los primeros y los últimos concentran la radiación solar en un eje (dos dimensiones), mientras que los sistemas de torre y los discos parabólicos lo hacen en un punto (tres dimensiones), pudiendo alcanzar por ello mayores relaciones de concentración.

La tecnología de CCP es la adecuada para la planta desalinizadora puesto que trabaja con una temperatura del fluido entre los 100 y 400 °C, concordando con las temperaturas de los fluidos de trabajos seleccionados en la sección anterior.

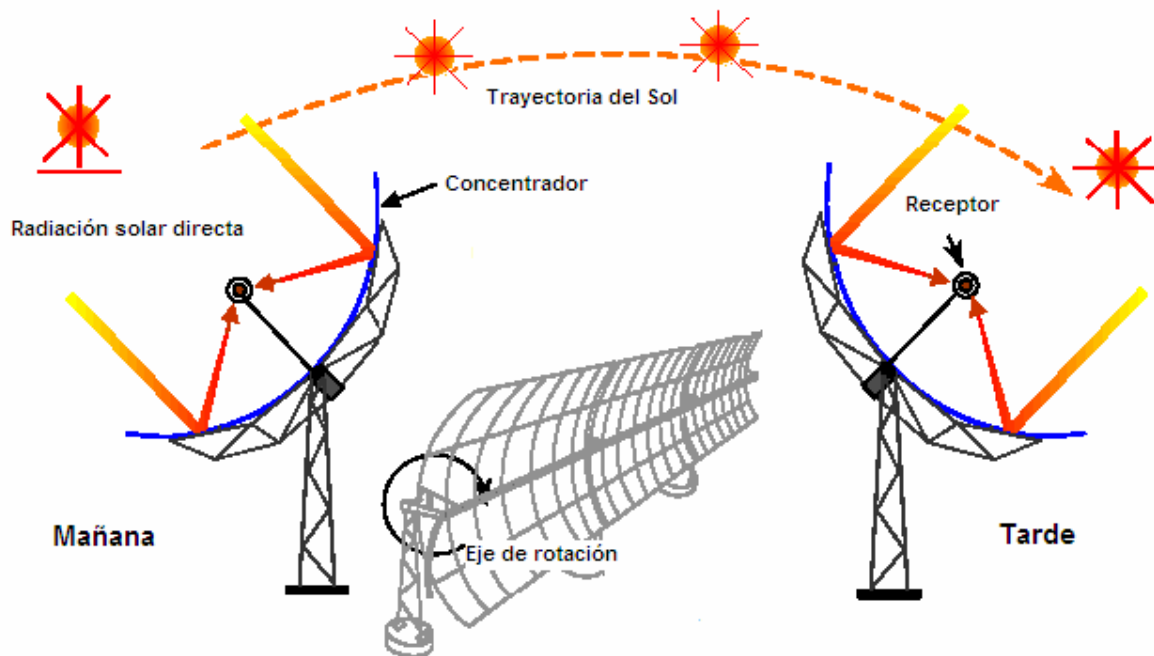


Figura 4.4: Esquema de seguimiento solar por parte de un colector solar cilindro-parabólico

En el mundo, existe variadas plantas solares que utilizan esta tecnología como medio de generación térmica y eléctrica, como por ejemplo la Plataforma Solar de Almería en España y en el sur del Estado de California en EEUU. Es por esto que se tiene buen respaldo de esta tecnología donde la información y exactitud es amplia y detallada.

Los CCP son concentradores solares de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede alcanzar hasta 400 °C en los casos más favorables. Por dicha temperatura, están clasificados dentro de los colectores solares de media temperatura.

Los elementos que componen un CCP se detallan del siguiente modo:

- Tubo de absorción o receptor: es el elemento fundamental en un CCP, puesto que el rendimiento global del colector depende en gran parte de la calidad termodinámica del absorbente. Puede constar de un tubo o dos tubos concéntricos. En el último caso, el tubo interior es metálico y es por el cual circula el fluido que se calienta, y el tubo exterior es de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento que posee una elevada absorción y baja emisividad. El tubo de cristal, tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger de las inclemencias del clima debido a su recubrimiento selectivo. El tubo de cristal suele llevar también un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad a la radiación solar y así aumentar el rendimiento óptico del colector.
- Reflector cilindro parabólico: tiene como objetivo reflejar y concentrar sobre el tubo receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. Entre los materiales usados para la reflexión se encuentran plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas, o el más usado, de vidrio, sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi.
- Estructura metálica: es la encargada de dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen
- Sistema de seguimiento solar: el seguimiento del sol se hace con el objetivo de aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector y se mantengan en el foco lineal continuamente. Normalmente el seguimiento se realiza a un eje pues mecánicamente es más sencillo, esto implica menos costos y menores pérdidas térmicas por no haber tuberías pasivas. Los

mecanismos de accionamiento que mueven al colector pueden ser eléctricos, hidráulicos y mecánicos, dependiendo del tamaño y capacidad.

Este tipo de colectores tienen una eficiencia termodinámica muy buena en comparación con otros, y es por ello que se usan en algunos procesos industriales como en la producción de acetona, procesamiento de residuos, industria láctea, generación de vapor, así como en la producción de electricidad.

4.3 Captador solar térmico CCP LS-3

Dentro de la familia de modelos comerciales de captadores cilindro parabólicos el modelo LS-3 es uno de los captadores de mayor tamaño y ha sido utilizado en algunas grandes plantas solares termoeléctricas instaladas en California. Estos datos avalan la selección de este modelo de CCP para conformar la parte solar del sistema de desalación mediante energía solar térmica.

Este modelo de CCP se puede catalogar de gran tamaño, con una anchura de parábola de 5,76m y una longitud de cada concentrador de 11,98m. Estas dimensiones son las mismas que las del CCP EUROTROUGH y entre los modelos de menor tamaño podemos mencionar el IND300 con una anchura de parábola de 1,3m y una longitud del concentrador de 6m.

El rendimiento del CCP LS-3 viene dado por la siguiente expresión:

$$\eta_{LS3}(\bar{T}_{abs}, G_b, \theta) = \eta_{opt,0^\circ} \cdot K(\theta) \cdot F_e - \frac{U_L^{abs}}{C_g} \frac{(\bar{T}_{abs} - T_{amb})}{G_b} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

$\eta_{opt,0^\circ}$: rendimiento óptico del captador para un ángulo de incidencia nulo [%]

F_e : grado de ensuciamiento de los espejos del captador

C_g : factor de concentración geométrica

θ : ángulo de incidencia de la radiación solar directa

G_b : irradiancia solar directa [W/m²]

$\bar{T}_{abs}$: temperatura media del tubo absorbedor [K]

T_{amb} : temperatura ambiente [K]

$K(\theta)$: el modificador por ángulo de incidencia

U_L^{abs} : coeficiente de pérdidas térmicas referido a la unidad de área del tubo absorbedor [W/m²K]

El factor $K(\theta)$, en el caso del CCP LS-3, viene definido de la siguiente forma:

i	k_i
0	1
1	$-2.23073 \cdot 10^{-4}$
2	$-1.1 \cdot 10^{-4}$
3	$3.18596 \cdot 10^{-6}$
4	$-4.85509 \cdot 10^{-8}$

$$K(\theta) = \begin{cases} \sum_{i=0}^4 k_i \cdot \theta^i & \text{si } 0^\circ < \theta < 80^\circ \\ 0 & \text{si } 85^\circ < \theta < 90^\circ \end{cases}$$

El coeficiente de pérdidas térmicas U_L^{abs} se suele expresar como un polinomio, en función de la temperatura del tubo absorbedor y la temperatura ambiente:

$$U_L^{abs} = a + b \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb}) + c \cdot (\bar{T}_{abs} - T_{amb})^2 \quad [\text{w/m}^2 \cdot \text{K}] \quad \text{Ec. 4.2}$$

En el caso del CCP LS-3, se proporcionan los valores de los coeficientes a, b y c de la ecuación anterior para el tubo absorbedor original que se montó con dicho captador. Dicho tubo está compuesto de acero inoxidable, tiene un diámetro exterior de 70[mm] y se encuentra alojado de forma concéntrica en un tubo de vidrio. Estos coeficientes dependen de la temperatura media de absorción en el tubo y se expresan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores de los coeficientes de las pérdidas térmicas dependiendo de la temperatura promedio de absorción

Rango	a	b	c
$\bar{T}_{abs} < 200 \text{ }^\circ\text{C}$	0,687257	0,001941	$2,6 \cdot 10^{-5}$
$200 \text{ }^\circ\text{C} < \bar{T}_{abs} < 300 \text{ }^\circ\text{C}$	1,433242	-0,00566	$4,6 \cdot 10^{-5}$
$300 \text{ }^\circ\text{C} < \bar{T}_{abs}$	2,895474	-0,0164	$6,5 \cdot 10^{-5}$

Fuente: Agustín M. Delgado Torres 2006

Como se ha mencionado anteriormente, el rendimiento del captador depende principalmente de la radiación directa recibida en el tubo absorbedor y la temperatura ambiental de donde se encuentre. Es así que para realizar un pequeño análisis del rendimiento térmico del CCP LS-3 se han dado valores arbitrarios de irradiancia solar de 500 y 900 W/m² y se han supuesto temperaturas ambientes de 10 y 20 °C. Esto, para visualizar la importancia de la temperatura de absorción del colector solar sobre el rendimiento de éste.

Los valores de los otros parámetros de la ecuación para calcular el rendimiento del CCP LS-3 son los siguientes: rendimiento óptico para un ángulo de incidencia nulo $\eta_{opt,0^\circ}=0.75$, grado de ensuciamiento $F_e=0.967$ y razón de concentración geométrica $C_g=26.2$.

En el gráfico de la figura 4.5 se ha representado el rendimiento del CCP LS-3 en función de la temperatura del tubo absorbedor para los valores de los parámetros anteriores y un valor nulo del ángulo de incidencia.

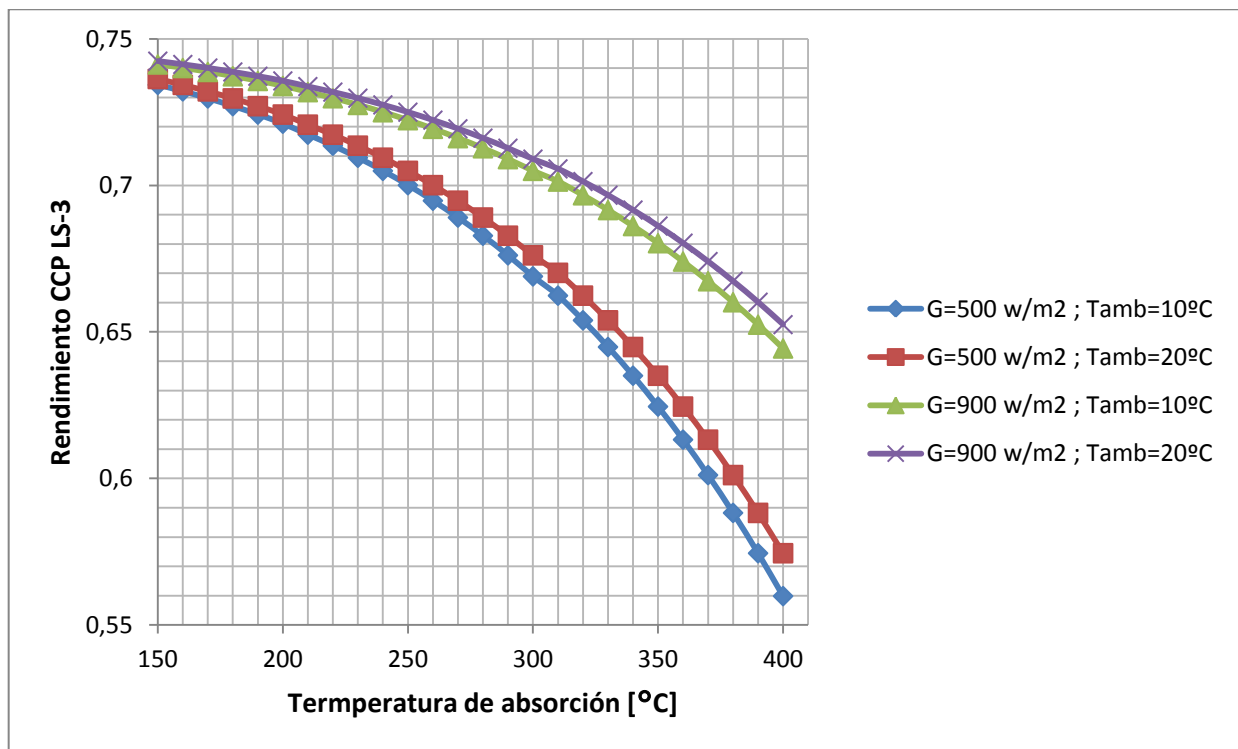


Figura 4.5: Rendimiento del CCP LS-3 en función de la temperatura de absorción

A grandes rasgos se puede apreciar que el captador solar CCP LS-3 obtiene rendimientos disminuidos cuando alcanza temperaturas de absorción aproximadas de 400 °C. Cabe resaltar la importancia de la radiación solar sobre el rendimiento del colector que a una misma temperatura

ambiente, puede alcanzar bajas en su rendimiento cercanos al 10% (en el caso de 400 °C de temperatura de absorción).

4.3.1 Especificaciones técnicas del CCP LS-3

Las especificaciones del colector solar son de importancia para realizar el cálculo de los rendimientos de éste, en cada ciudad seleccionada así como también para dimensionar el tamaño necesario para la planta solar.

Algunos de los datos relevantes sobre el CCP LS-3 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Especificaciones técnicas del colector solar cilindroparabólico LS-3

Especificación	Descripción
Rendimiento óptico con ángulo incidente nulo	75%
Área de apertura	545 [m ²]
Absortividad	95%
Transmisividad	93%
Distancia focal del concentrador	1,71 [m]
Ancho de parábola	5,76 [m]
Concentración geométrica	26,2
Seguimiento solar	Si, sistema hidráulico
Temperaturas límites del aceite térmico	Entre 12 a 400 [°C]
Tipo de aceite	M-VP1
Volumen del aceite térmico	1,092 [m ³]
Temperatura de entrada al colector	170 [°C]
Temperatura de salida del colector	340 [°C]

Fuente: Agustín M. Delgado Torres 2006

4.4 Dimensión de la planta solar térmica

La dimensión de la planta solar térmica, en cuanto a área total de colectores solares, está condicionada directamente al funcionamiento del ciclo Rankine orgánico. Dependiendo de cada fluido de trabajo que se utilice en éste, se obtienen diferentes áreas de aperturas.

El área de apertura de un colector solar corresponde a la máxima proyección plana de la superficie de éste a la radiación solar incidente no concentrada y para un sistema de ciclo Rankine orgánico-osmosis inversa es en función de la radiación solar local, la potencia neta generada por el CRO y las eficiencias tanto de la planta solar como del CRO se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{W_{net}}{I_{solar} * \eta_{CRO} * \eta_{solar}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

donde:

A : área de apertura total necesaria de colectores solares [m^2]

W_{net} : trabajo neto generado por la planta CRO [kW]

I_{solar} : radiación solar local [kW/m^2]

η_{CRO} : rendimiento total de la planta CRO [%]

η_{solar} : rendimiento total de la planta solar [%]

4.5 Cálculos referidos a la planta solar con CCP LS-3 en las ciudades seleccionadas

Para desarrollar el cálculo de rendimiento del colector, se hace uso de la ecuación 4.1 descrita en la sección 4.3 correspondiente al rendimiento del colector CCP LS-3. Este desarrollo sólo depende de la ciudad en donde se encuentre ubicado el colector, es decir, de la radiación solar incidente en éste y la temperatura ambiente de la ciudad.

De los datos de entrada para este cálculo, aparte de los mencionados en las especificaciones del colector CCP LS-3, son la temperatura de entrada y salida del fluido de 170 °C y 340°C respectivamente. Esto significa que la temperatura de absorción del colector correspondería a 255°C y los coeficientes a, b y c entran en el rango $200\text{ °C} < \overline{T}_{abs} < 300\text{ °C}$.

Los resultados que se muestran en la tabla 4.4, producto del desarrollo que se especifica en el Anexo A, son un resumen de un análisis anual de todas las ciudades en cuestión donde se ilustran los máximos, mínimos y promedio anual del rendimiento del colector solar, además de la radiación solar recibida por la ciudad el año 2014.

Tabla 4.4: Rendimientos alcanzados en cada ciudad con el colector CCP LS-3

Ciudades	Rendimiento mínimo	Rendimiento máximo	Rendimiento promedio anual	Radiación anual [kWh/m²]
Arica	Julio: 70,83%	Febrero: 72,19%	71,69%	1674,52
Iquique	Junio: 70,82%	Febrero: 72,28%	71,72%	1732,93
Antofagasta	Junio: 70,82%	Febrero: 72,29%	71,67%	1852,97
La Serena	Junio: 69,47%	Enero: 72,04%	71,06%	1541,11
Valparaíso	Junio: 69,13%	Enero: 72,02%	70,91%	1413,04
Concepción	Junio: 68,22%	Diciembre: 71,94%	70,56%	1505,86
Valdivia	Julio: 59,60%	Diciembre: 70,85%	67,18%	1215,82
Puerto Montt	Julio: 64,55%	Diciembre: 71,51%	68,91%	1038,03

Fuente: Elaboración propia

De los rendimientos obtenidos de todas las ciudades en estudio se observa que no existe mayor diferencia en el promedio anual. Sin embargo, los mejores resultados obtenidos estuvieron en las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta, debido principalmente a que reciben mayor radiación y presentan mejores condiciones climáticas que las otras ciudades.

Las ciudades de Valdivia y Puerto Montt son las que presentan un rendimiento anual más bajo que las demás ciudades, y esto debido a que en el periodo de invierno se presenta bajos rendimientos por las malas condiciones climáticas.

Sin embargo, se realiza el análisis del área de apertura necesaria para todas las ciudades estudiadas, a diferencia de los fluidos de trabajo que sólo se utilizará el tolueno, con mayor rendimiento en CRO.

La fórmula necesaria para dimensionar el área solar, corresponde a la ecuación 4.3 descrita en la sección 4.4. Para dicha fórmula se utilizan los correspondientes valores anuales al colector solar, es decir, el promedio de la radiación solar y el promedio del rendimiento del colector a lo largo del año. Los datos correspondientes al CRO, se obtienen directamente de las tablas desarrolladas en la sección 3.3.

Tabla 4.5: Área de apertura necesaria para cada ciudad, con fluido de trabajo el tolueno

Ciudad	Radiación horaria	Área apertura [m ²]
	[kW/m ²]	Tolueno
Arica	0,75	287,1461
Iquique	0,76	283,2494
Antofagasta	0,76	283,4470
La Serena	0,68	319,5131
Valparaíso	0,66	329,8917
Concepción	0,62	352,9170
Valdivia	0,41	560,5302
Puerto Montt	0,5	448,0955

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos, claramente se observa la importancia de una selección adecuada del fluido de trabajo en CRO. Esto se debe principalmente al rendimiento de cada uno de los fluidos de trabajo. Por esta razón, es que se ha seleccionado al tolueno como el fluido de trabajo más adecuado para la generación de potencia del CRO.

Como se mencionaba anteriormente, la ciudad es de vital importancia en cuanto a la radiación solar que poseen. Las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta siguen siendo fuertes candidatos obteniendo resultados muy similares de área de apertura necesaria para la planta solar. A medida que aumenta el área de apertura necesaria para los colectores, aumenta también la inversión del proyecto de forma considerable, ya que la planta solar es la que mayor incidencia posee sobre dichos costos.

Para en el caso en que la planta en general funciona sólo con energía solar, existe el problema de la generación continua de 36[kW] a lo largo del día, ya sea por problemas meteorológicos o por época de invierno y verano. Existirá una diferencia de producción en este caso, la cual se soluciona en los escenarios 2 y 3, donde la planta funciona de forma integral con la energía del SING, manteniendo una producción constante con los 36[kW].

CAPITULO 5: SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA

Los sistemas de osmosis inversa, en la desalación de agua de mar, ha demostrado ser una tecnología fiable y económicamente sostenible para la obtención de agua potable a partir de la segunda mitad del siglo XX, siendo la única alternativa posible de abastecimiento de recursos de agua para el consumo humano e industrial, para el desarrollo de numerosas regiones del mundo, como algunas áreas en las Islas del Caribe, Estados Unidos, India, Australia, China, costas del Mediterráneo, África, Oriente Medio, entre otras.

La desalación se puede realizar mediante diferentes técnicas como la destilación, la congelación, la evaporación instantánea o la formación de hidratos. Sin embargo, en la actualidad el método de osmosis inversa es el más utilizado y extendido.

La osmosis es un proceso natural que ocurre en los tejidos de plantas y animales. De forma esquemática se puede decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones (formadas por un solvente y un soluto disuelto en el solvente), se unen a través de una membrana que permite el paso del solvente pero no del soluto, existe una circulación natural del solvente a través de la membrana, desde la solución menos concentrada hacia la de mayor concentración. La diferencia de altura obtenida se traduce en una diferencia de presión llamada presión osmótica.

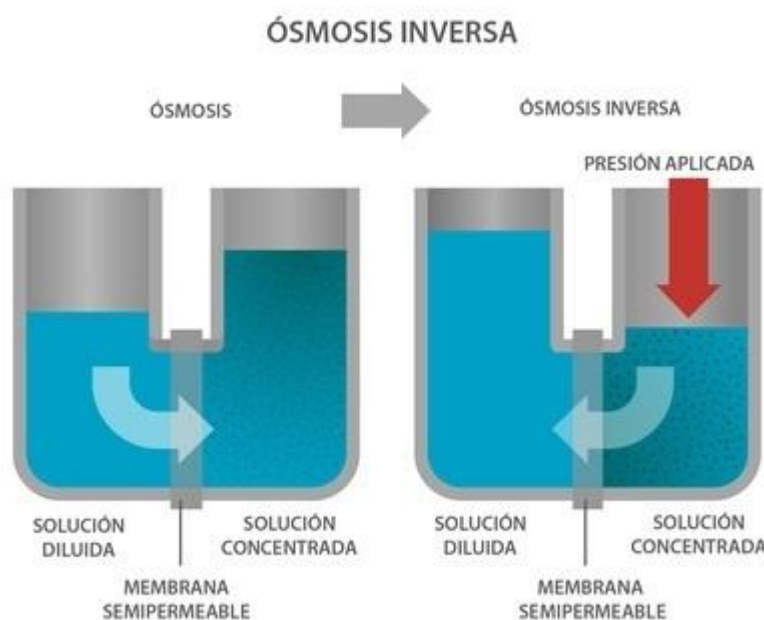


Figura 5.1: Esquema del proceso de osmosis y osmosis inversa

Sin embargo, aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una solución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular el solvente desde la solución más concentrada a la solución con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible.

5.1 Esquema planta osmosis inversa

La complejidad de una instalación desaladora varía según el tamaño de la misma y el tipo de agua que va a tratar. La mayoría de las plantas poseen un sistema de recuperación de energía y sistemas de control, dependiendo del tamaño. A continuación se muestra un esquema general de una planta de osmosis inversa:

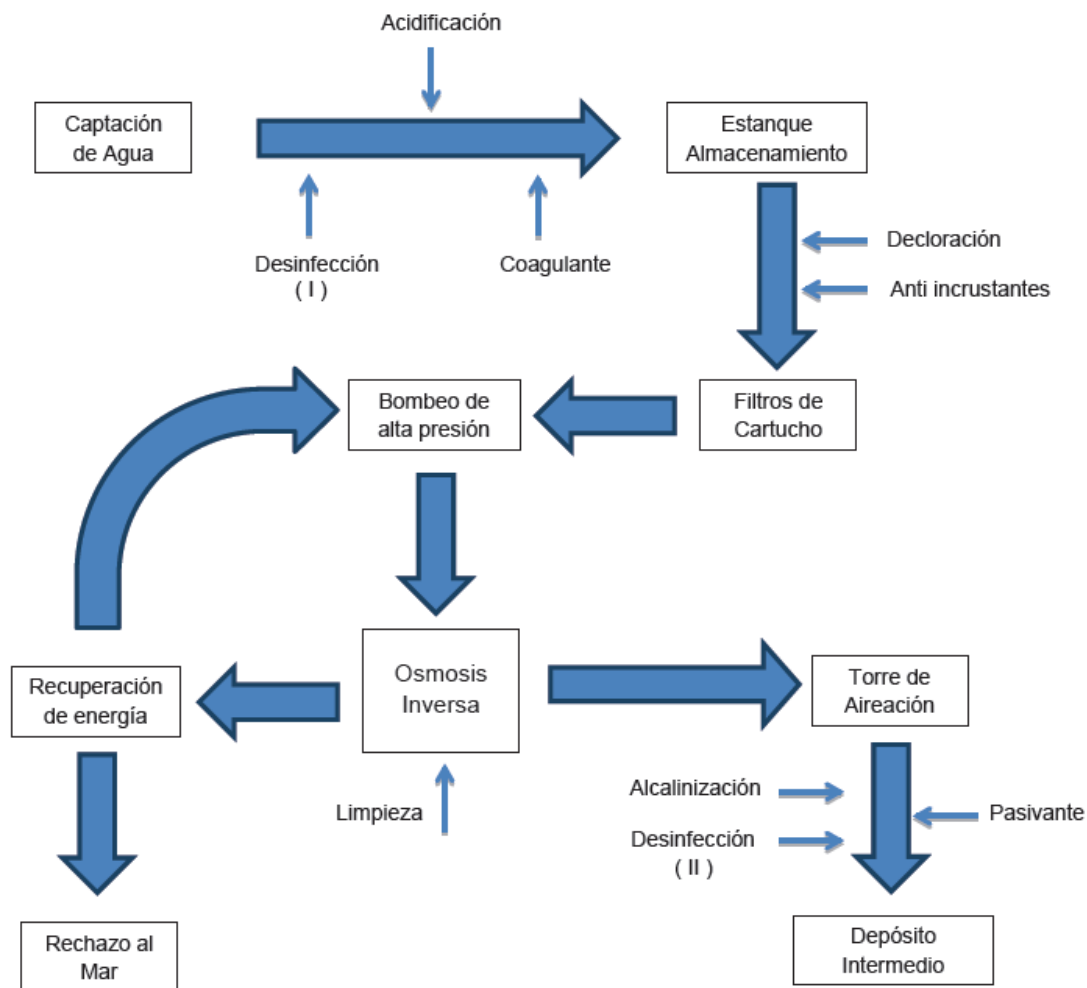


Figura 5.2: Esquema de procesos en una planta de osmosis inversa

5.2 Descripción de procesos de desalación por osmosis inversa

El proceso completo de desalación que se sigue normalmente en una planta desaladora del tipo osmosis inversa se describe a continuación:

5.2.1 Captación de agua de mar o salobre:

Lo primero es la obtención del agua bruta, ya sea agua marina o bien agua proveniente de fuentes superficiales o subterráneas con altos contenidos salinos. Independientemente de la fuente que se trate, las tuberías conducen el agua hasta la costa o el lugar de emplazamiento de las instalaciones, donde es impulsada por una estación de bombeo a la planta.

Actualmente se conocen dos tipos de tomas de agua: cerradas o a través de pozo, y abiertas o superficiales.

La toma de agua cerrada es la más favorable y la que siempre está presente en las tomas de agua de mar. Tiene ventajas de que el agua se encuentra limpia como consecuencia de su filtrado en el terreno, lo que significa unos índices de turbidez y de colmatación bajos. También presenta ausencia de actividad orgánica y biológica, bajo contenido de oxígeno disuelto, baja contaminación y temperaturas estables.

La toma de agua abierta presenta mayores dificultades técnicas, administrativas, además de un mayor costo. Se recurre a ellas generalmente cuando las características de impermeabilidad del terreno no permiten el anterior tipo de captación. El agua captada, a una determinada distancia de la costa, debe ser recogida en un depósito. Ésta presenta inconvenientes como actividad orgánica y biológica de consideración, contenido en sólidos en suspensión importante, mayor exposición a la contaminación, contenido más elevado de oxígeno disuelto, amplio margen de variación de temperaturas y composición química más homogénea.

5.2.2 Pre-tratamientos:

El agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos y no orgánicos que deben ser controlados dentro de unos determinados límites, ya que de lo contrario producirían un importante deterioro de las membranas y tuberías. Para controlar estos componentes que impedirían el funcionamiento correcto de la instalación, se deben aplicar los siguientes tratamientos:

Físicos

El pre-tratamiento físico al agua de mar se encarga de eliminar fundamentalmente elementos sólidos, gases y materia orgánica. El nivel de filtración es de 5 micras, valor que imponen los fabricantes de membranas como condición indispensable para garantizar el funcionamiento correcto de éstas.

Los componentes físicos en suspensión del agua comprenden desde arenas hasta partículas coloidales. Éstas proceden de la erosión de los terrenos, la disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas.

El ensuciamiento por elementos sólidos tiene efectos de tipo físico, por rozamiento y desgaste de los poros de las membranas; y del tipo químico, ya que la capa de partículas despositada sobre la superficie de éstas produce la formación de precipitados químicos.

Se recurre a distintos procesos de filtración que cubren la fase de separación de sólidos contenidos en líquidos y estos son:

- Filtración previa: para eliminar particular en suspensión.
- Microfiltración y ultrafiltración: disminuye el contenido en coloides prácticamente por completo.
- Filtración de seguridad y mezclado: se realiza al final del pre-tratamiento y tiene la doble misión de filtrar posibles partículas que puedan haber escapado en alguna etapa anterior y de conseguir una mezcla homogénea de todos los aditivos incorporados en el proceso.

Químicos

El agua que se va a desalar no puede enviarse a los bastidores de membranas, ya que la composición química del agua o la actividad biológica que en ella se desarrolla pueden crear problemas a las membranas.

Además, las membranas tienen unas condiciones óptimas de funcionamiento, como temperatura, pH y presión, por ende es necesario tratar al agua para obtener el mayor rendimiento de la instalación.

- Cloración previa: tiene la misión de oxidar la materia orgánica y de interrumpir los desarrollos bacteriológicos durante el proceso.

- Acidificación: para conseguir un pH ligeramente ácido.
- Adición de coagulantes: ayuda a eliminar las partículas coloidales antes de la filtración.
- Decoloración: para eliminar el cloro en exceso.
- Adición de anti-incrustantes: evita las incrustaciones salinas en la superficie de las membranas.

5.2.3 Proceso de osmosis inversa

Finalizados los pretratamientos físicos y químicos, el agua bruta queda en perfectas condiciones para ser conducida hacia los módulos de osmosis inversa, sin peligros de que se produzcan atascamientos en su interior.

El área del proceso comprende los siguientes elementos:

- Bomba de alta presión: introduce el agua bruta pretratada en el interior de los módulos, suministrando la presión necesaria para el proceso.
- Bastidores de osmosis inversa: son las estructuras donde se colocan los tubos de presión y las membranas semipermeables que separarán el permeado (agua exenta de sales), de la salmuera (agua concentrada en sales).
- Sistema de lavado: constituye un sistema de lavado químico periódico de las membranas.

Después de la fase de osmosis inversa se obtiene un permeado exento de sales.

5.2.4 Post-tratamientos

El agua desalada se debe convertir en agua potable. Para ello, ésta se debe someter a una serie de tratamientos, los cuales han de garantizar una estabilización, descarbonatándola y corrigiendo su pH, y una desinfección del agua para poder ser utilizada para el consumo humano.

El agua desalada está desequilibrada debido a su:

- Bajo pH de aproximadamente 5,5
- Baja alcalinidad
- Pobre contenido en calcio
- Presencia de CO₂, las membranas de osmosis inversa no presentan impermeabilidad frente a las moléculas gaseosas.

Debido a su baja alcalinidad y su contenido de CO_2 el agua desalada es corrosiva y puede disolver los precipitados de las tuberías. Por ello es necesaria su estabilización que se conseguirá mediante los procesos de:

- Desgasificación o descarbonatación: para la reducción del CO_2
- Alcanización: adición de productos para terminar de ajustar el pH
- Mezcla con otras aguas

Además, para evitar la corrosión de las tuberías de la red de distribución e impedir que el agua pueda contaminarse se le aplicará:

- Pasivación
- Cloración

5.3 Sistema de recuperación de energía

El consumo eléctrico en desalinización ha ido disminuyendo de forma considerable desde los años 70. La búsqueda de un menor consumo energético para este tipo de plantas, ha sido el principal objetivo a modo de mejora continua y se ha hecho siempre siguiendo tres pilares fundamentales:

- Mejora de membranas
- Mejora de la eficiencia de las bombas de alta presión
- Uso de equipos de recuperación de energía.

Siendo esta última tecnología con mejores resultados en los últimos tiempos.

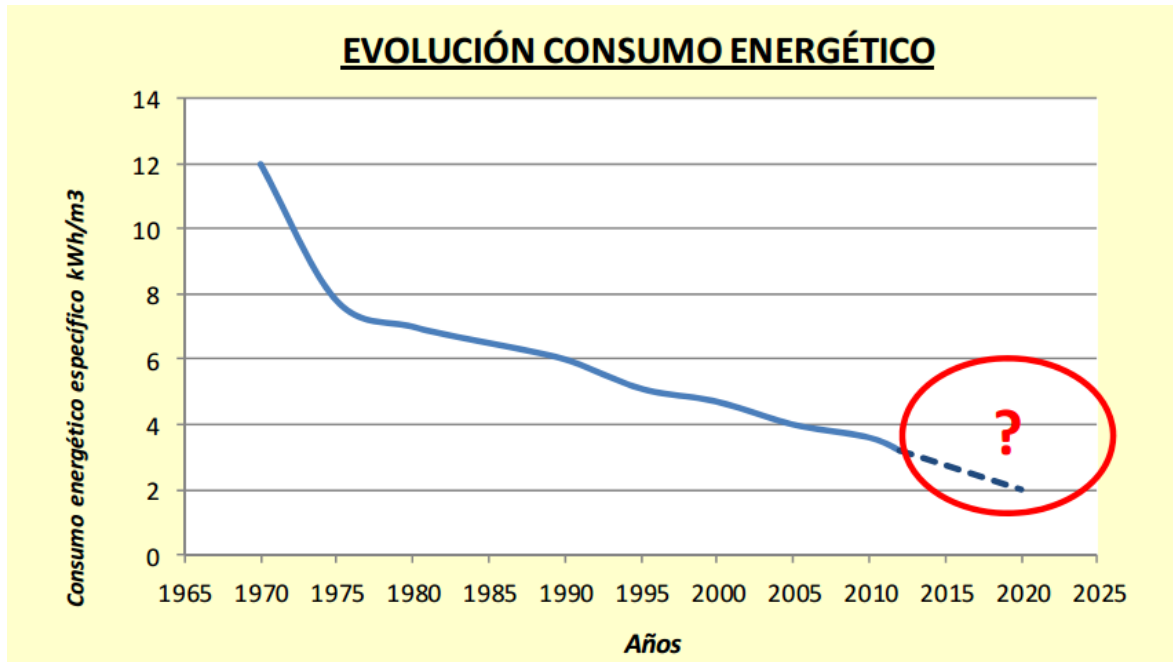


Figura 5.3: Gráfico de la evolución del consumo energético a lo largo de los años

Los equipos de recuperación de energía se utilizan en desalinización con osmosis inversa desde principios de los años 80. El objetivo de estos equipos es recuperar la energía de presión del concentrado y utilizarla en el proceso. Esta energía es en función de dos parámetros:

- Caudal de rechazo.
- Presión de funcionamiento de la instalación.

Cuanto mayor sean ambos, mayor será la recuperación de la energía. De esta manera, las plantas con conversiones menores y presiones de funcionamiento altas, son idóneas para la utilización de elementos de recuperación de energía.

La salmuera rechazada, en un sistema de osmosis inversa, corresponde aproximadamente al 55% del agua bruta entrante (depende de la tecnología de desalinización empleada) mientras que el 45% del agua obtenida sale a presión atmosférica. El flujo de rechazo siempre contiene entre 45% y 55% de la energía de presión proporcionada por la bomba de alta presión y es muy conveniente la recuperación de esta energía para obtener un mayor rendimiento. Una parte de la energía recuperada puede volver al mismo ciclo de desalinización y recuperación más de una vez, dependiendo de las características de cada planta.

Los primeros equipos para la recuperación de la energía, fueron del tipo centrífugo como las turbinas Francis, que al tiempo fueron desplazadas poco a poco por las turbinas Pelton. Luego, y en la actualidad, están siendo usados los intercambiadores de presión a modo de recuperación de energía pero aún no han desplazado al uso común de las turbinas Pelton.

De los dos actuales métodos de recuperación de energía, y en caso de una planta de osmosis inversa de baja producción de agua, el que supone menores costos de inversión, operación y mantenimiento consiste en la instalación de una turbina Pelton, que se impulsa por el flujo de salmuera de rechazo.

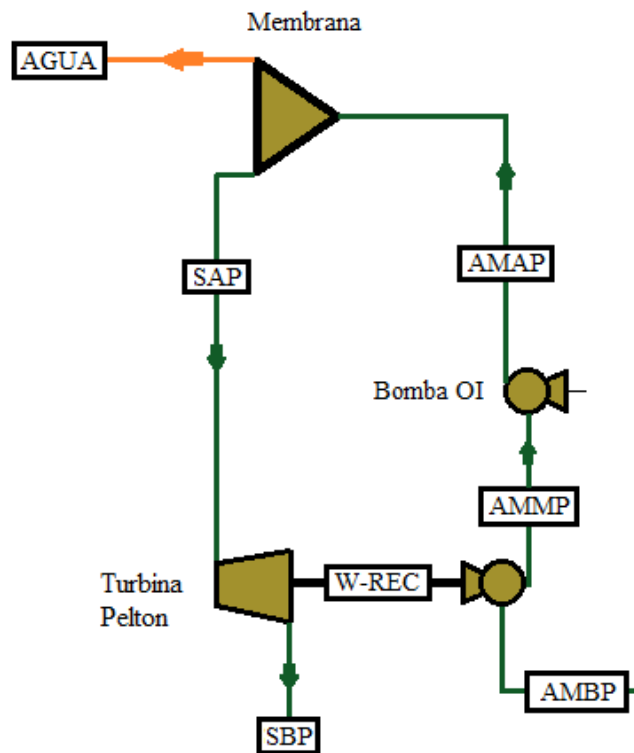


Figura 5.4: Esquema representativo del subsistema osmosis inversa

Como se muestra en la figura 5.4, la turbina Pelton es accionada por el flujo de salmuera a alta presión y como rechazo, la salmuera a baja presión o presión atmosférica. La turbina está acoplada al eje de una bomba la cual aumenta la presión del agua a desalinizar hasta alcanzar una presión intermedia, antes de ser nuevamente comprimida por la bomba de alta presión.

La velocidad de flujo de la salmuera sobre el rotor se controla ajustando la posición de una boquilla en relación al orificio de entrada. De esta manera se dirige un chorro concentrado a alta presión sobre los álabes de la turbina provocando la rotación de la misma.

El diseño de la turbina Pelton, está optimizado para garantizar que la mayor parte de la energía potencial del chorro de salmuera sea convertido en energía mecánica rotatoria, siendo descargado el líquido prácticamente a presión atmosférica, y adquiriéndose un régimen de funcionamiento a los 2 o 3 minutos de la puesta en marcha.

5.4 Cálculos en osmosis inversa y flujo de agua desalinizado

Como se menciona en el principio del proyecto, se tienen tres escenarios distintos de evaluación donde varían las producciones de agua dulce y la alimentación energética de la planta OI, así como las horas de funcionamiento. Para estos tres escenarios se considera un consumo energético de 36[kW] (usando el tolueno como fluido de trabajo), tanto de la energía proveniente de CRO como del SING.

Dentro de los cálculos que están presente de forma común en los tres escenarios, está el cálculo de la recuperación de energía y la del flujo de agua desalinizada. Ambos cálculos son realizados bajo indicadores que son comunes para este tipo de plantas.

Para el desarrollo del trabajo recuperado usando la salmuera de rechazo desde la membrana, y como fue explicado en la sección anterior, por medio de una turbina Pelton. Cuando se usa este tipo de recuperación de energía, la recuperación varía entre un 45 a 55% del trabajo utilizado en la bomba de alta presión. Bajo este criterio, se considera el trabajo recuperado por la turbina Pelton de un 50%.

Luego, utilizando el trabajo neto en CRO de 36 [kW] aproximadamente, se logran recuperar hasta 18 [kW] de la salmuera de rechazo. Por lo tanto, el trabajo neto dentro del ciclo de osmosis inversa logra alcanzar 54 [kW] los cuales son directamente utilizados para calcular el flujo de agua desalinizado. Para conocer dicho flujo desalinizado, es necesario conocer la relación del consumo energético de la planta sobre la cantidad de agua obtenida, que se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Consumo eléctrico para una planta de osmosis inversa

	Osmosis inversa
Consumo de electricidad [kWh/m ³]	3 – 4.5

Fuente: Patricio Alejandro Soto Aravena 2013

Para el escenario 1 se tiene un funcionamiento de la planta OI alimentada sólo con la energía solar. Esto es, un funcionamiento parcial de la planta que cubre 9[h] del día (luz solar) de producción de agua dulce. Con estos datos, y usando el valor mostrado en la tabla 5.1, se tiene una producción de agua dulce de 121,5 [m³/día].

Luego, en el escenario 2, se tiene un funcionamiento parcial de la planta OI alimentada con energía solar y además con energía del SING. Por lo tanto, se suma la producción de agua que se obtiene en el escenario 1, con la producción que se obtiene por la energía del SING. Éste último cubre 9[h] adicionales al funcionamiento de la planta solar, logrando así duplicar la obtención de agua dulce alcanzado un total de 243 [m³/día].

Por último, se tiene el escenario 3 donde el funcionamiento de la planta OI deja de ser parcial para ser un proceso continuo, alimentado tanto de energía solar como energía proveniente del SING. Por lo tanto, a las 9[h] de funcionamiento de la planta alimentada con energía solar, se le añaden 15 [h] de funcionamiento mediante consumo del SING. De estas 15[h] de funcionamiento, y usando el indicador de la tabla 5.1, se obtienen 202,5 [m³/día] de agua desalinizada y que al sumarlo con las 9[h] de funcionamiento solar se alcanza una producción final de 324[m³/día] de agua producto.

CAPITULO 6: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PLANTA

Este capítulo de evaluación económica de la planta es muy importante ya que determina económicamente si el proyecto es viable o no llevarlo a cabo. Dentro de éste se muestran todos los ítems necesarios para elaborar el flujo de caja del proyecto y los resultados obtenidos de rentabilidad.

La viabilidad de una instalación depende en primera instancia del precio final que se pueda obtener del producto, en este caso, agua dulce. Para esto, se han dispuesto 4 casos de evaluación donde varía el precio de venta del agua producto. Si bien la localidad escogida es Antofagasta, se considera la opción de venta a zonas rurales aledañas que alcanzan precios más altos de venta.

Por otra parte, el alto costo de inversión que se presenta en la planta de colectores solares, hace que el proyecto en sí sea poco rentable. Es por esto que se ha decidido complementar el funcionamiento de la planta con energía proveniente del SING para lograr aumentar la producción del agua sin tener que aumentar el tamaño de la planta solar, y por ende, sin aumentar de forma significativa la inversión.

6.1 Flujo de caja

Para realizar el correcto flujo de caja de este proyecto, es necesario establecer ciertos valores en torno a la economía actual, tanto nacional como mundial, y quedan mostrados en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Parámetros económicos para el flujo de caja para el 2015

Parámetros	Valor	Unidad
Impuesto a la renta	20	%
Tasa de descuento	11	%
Tipo de cambio	765	€/ \$
Crecimiento anual	1,5	%

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de caja para cada uno de los 3 escenarios, se realizan con un horizonte de evaluación a dos periodos. El primero de ellos a 20 años y el segundo a 30 años. Esto, puesto que la vida de los activos principales del proyecto constan entre 20 y 30 años de vida útil.

Ahora, como se ha mencionado anteriormente, se tienen 3 escenarios de evaluación sobre la planta en general, donde varía principalmente el flujo de agua dulce producido con distintas alimentaciones energéticas.

A continuación se detalla cada uno de los escenarios a evaluar:

Tabla 6.2: Producción de agua dulce y horas de funcionamiento para cada escenario

Item	Agua dulce por E. solar	Agua dulce por E. SING	Agua dulce total	Tiempo producción E. solar	Tiempo producción E. SING
	[m ³ /día]	[m ³ /día]	[m ³ /día]	[hora]	[hora]
Escenario 1	121,5	0	121,5	9	0
Escenario 2	121,5	121,5	243	9	9
Escenario 3	121,5	202,5	324	9	15

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el flujo de caja, hace falta especificar cuáles serán los costos del proyecto, así como también los ingresos que se tendrán por la venta de agua dulce. Estos ítems se detallan en las siguientes secciones.

6.2 Ingresos

Los ingresos que se pueden obtener de una planta desalinizadora de agua de mar, son netamente de la venta de agua producto.

Según la empresa de agua potable en Antofagasta, Aguas Antofagasta, los precios de venta varían desde 930 a 1328 [\$/m³] dependiendo de la localidad en donde se encuentre. Es por esto que se han establecido 4 valores de venta del agua producto para cada escenario en cuestión, siendo estos de:

Tabla 6.3: Valores de venta del agua producto para cada caso

	Valor de venta [\$/m³]	Crecimiento anual [%]
Caso 1	900	1,5
Caso 2	1000	1,5
Caso 3	1100	1,5
Caso 4	1200	1,5

Fuente: Elaboración propia

6.3 Costos fijos

Los costos de producción u operación son los gastos necesarios para mantener el proyecto en funcionamiento y estos son clasificados en costos fijos y costos variables.

Los costos fijos son aquellos costos que no son sensibles a pequeños cambios en los niveles de actividad de una empresa, sino que permanecen invariables ante esos cambios.

Dentro de los costos fijos presentes en este proyecto, se encuentran el valor de la inversión y los costes de operación y mantenimiento, los cuales se dividen por cada subsistema de la planta.

6.3.1 Costos de inversión

Como se menciona anteriormente, los costos de inversión están divididos por cada subsistema a evaluar; es decir, se separan las inversiones en la planta OI, la planta solar y el CRO dependiendo de las capacidades de cada una.

Para los tres escenarios a evaluar se utilizan los mismos indicadores y los cuales se presentan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Especificación de costos de inversión para cada subsistema

Subsistema	Cantidad	Unidad
Osmosis inversa	1600	€/m ³ /día
Ciclo Rankine orgánico	2000	€/kW
Planta solar	400	€/m ²

Fuente: Joan Carles Bruno et al 2007

6.3.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

El tamaño de la planta, y por ende la producción de agua dulce, influye fuertemente en dichos costos. A una producción de gran escala, se aplican costos de operación y mantenimiento más bajos que a una producción de baja escala. Para el caso de este proyecto, estos costos son más elevados puesto que se trata de una planta pequeña.

De igual manera que los costos de inversión, los costos de O&M se separan por cada subsistema a evaluar y que se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5: Especificación de costos de O&M para cada subsistema

Subsistema	Valor	Unidad	Fuente
OI Escenario 1	0,4	€/m ³	Marcelo Leonel Montes 2011
OI Escenario 2	0,3	€/m ³	Marcelo Leonel Montes 2011
OI Escenario 3	0,2	€/m ³	Marcelo Leonel Montes 2011
CRO	135	€/kW anual	Joan Carles Bruno et al 2007
P. solar	10	% inversión solar	César Antonio Echeverría López 2011

6.4 Costos variables

Los costos variables son aquellos que se modifican con el tiempo, de acuerdo a variaciones del volumen de producción de una planta. Para el caso de la planta desalinizadora, no se cuentan con variaciones de producción.

Por otro lado, también se consideran costos variables, aquellos en los cuales no se tiene control directo de ellos, como lo es el costo de la energía eléctrica en los escenarios 1 y 2.

Para conocer el costo de la energía eléctrica, es necesario saber el consumo eléctrico específico de la planta en general además del valor a pagar por consumo energético del SING, y que se muestra en la tabla 6.6.

Tabla 6.6: Parámetros sobre consumo eléctrico y costo de la energía

Parametros	Cantidad	Unidad
Consumo eléctrico	3 – 4,5	kWh/m ³
Precio consumo eléctrico	110	\$/kWh

Fuente: Elaboración propia

6.5 Depreciación y valor residual

La depreciación es un método contable en el cual se cuantifica la disminución del valor de los activos por su uso y deterioro. Este valor, no constituye un costo real monetario para el proyecto, y por ende, debe sumarse una vez descontados los impuestos respectivos. Cabe destacar que este método otorga una disminución en los impuestos a pagar por una empresa.

Para realizar el cálculo de depreciación, se ha estimado que ésta sea lineal sobre un 80% de la inversión final en cada escenario, y a 20 y 30 años según corresponda. Esto es, en el caso de los 20 años, tendrá valor residual igual a cero al final del proyecto y del mismo modo para los 30 años.

6.6 Resultados

Realizados los flujos de caja correspondientes en cada escenario, se han obtenido las tablas que se muestran en las siguientes secciones. En este estudio, se evalúan 3 parámetros para verificar si el proyecto es rentable o no. Estos 3 parámetros de estudio corresponden al VAN (valor actual neto), el TIR (tasa interna de retorno) y el PRI (periodo de retorno de la inversión), y que a continuación se detallan sus resultados:

6.6.1 Resultados escenario 1

En la tabla 6.7 se muestra un resumen de los flujos de caja donde se expresan los parámetros mencionados anteriormente (más detalles en el anexo B). Los resultados de este escenario, como era de esperarse, no son muy atractivos si se habla de rentabilidad económica, a pesar de que 1 de los casos se obtiene un VAN positivo.

El escenario 1, a modo de recordatorio, es el que realiza sus procesos sólo con energía proveniente de la radiación solar, sin conectarse al SING.

Tabla 6.7: Resultados de flujo de caja para el escenario 1

Precio venta [\$/m³]	20 años de proyecto			30 años de proyecto		
	VAN [\$]	TIR	PRI [años]	VAN [\$]	TIR	PRI [años]
900	-134.066.861	-6%	Sin retorno	-113.282.218	-4%	Sin retorno
1000	-98.393.021,3	-4%	Sin retorno	-72.095.545,3	-2%	Sin retorno
1100	-62.719.181,6	-3%	Sin retorno	-30.908.872,5	-1%	Sin retorno
1200	-27.045.341,9	-1%	Sin retorno	10.277.800,4	0%	27

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que muestra este escenario, son los más negativos de los 3 estudiados pudiendo observar la mayoría de los VAN y TIR negativos, sin mencionar que no existe un PRI a lo largo del horizonte de evaluación. Sólo uno de los casos resultan valores positivos, del VAN y TIR, y un PRI a los 27 años, pero aún así no demuestra ser un proyecto rentable con dichos valores. Un retorno de la inversión a los 27 años no es aceptable para un empresario si el proyecto dura 30 años.

Una de las razones por las cuales este escenario no es rentable económicamente, es debido a la baja producción de agua dulce que se obtiene del proceso, versus el alto costo de inversión que conlleva la planta.

6.6.2 Resultados escenario 2

El escenario 2 en estudio funciona igual que el escenario 1, pero añadidas 9 horas de funcionamiento con consumo energético del SING. Así, se produce la doble cantidad de agua dulce pero, a la vez, aumenta su inversión total. En la tabla 6.8 se muestran los resultados de flujo de caja para este escenario.

Tabla 6.8: Resultados de flujo de caja para el escenario 2

Precio venta [\$/m³]	20 años de proyecto			30 años de proyecto		
	VAN [\$]	TIR	PRI [años]	VAN [\$]	TIR	PRI [años]
900	-142.885.702	-4%	Sin retorno	-113.868.514	-3%	Sin retorno
1000	-81.076.199	-2%	Sin retorno	-45.036.884,9	-1%	Sin retorno
1100	-28.373.155,7	-1%	Sin retorno	11.165.692,3	0%	27
1200	28.883.117,7	1%	18	73.682.795,5	2%	18

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos para este escenario son claramente mejores que el escenario 1. Sin embargo, aún no se presentan resultados económicamente muy llamativos para un empresario.

El caso óptimo que se presenta es para 30 años de proyecto con una venta del agua a 1200 [\$/m³]. Con un PRI bastante aceptable de 18 años lo que implica que se obtengan ganancias durante 12 años. Estas ganancias también son bastante aceptables y llamativas para un empresario, ya que un VAN aproximado de 73M\$ es económicamente rentable, pero aún así no alcanza para ser un buen proyecto.

Los parámetros usados en este escenario mejoraron significativamente los resultados de flujo de caja, convirtiéndolo en un proyecto más rentable que el escenario 1. Esto se debe principalmente al aumento de la producción del agua dulce que se duplica de un escenario a otro, como se menciona con anterioridad.

6.6.3 Resultados escenario 3

El escenario 3 es el que realiza sus procesos tanto con energía proveniente de la radiación solar como energía del SING. Esto es, con 9 horas de funcionamiento con la planta solar y 15 horas con funcionamiento por medio del SING. Por lo tanto, es el escenario que más agua dulce produce y por lo mismo, se espera que los flujos de caja mejoren significativamente.

A continuación se presentan en la tabla 6.9 los parámetros estudiados para cada caso de este escenario:

Tabla 6.9: Resultados de flujo de caja para el escenario 3

Precio venta [\$/m ³]	20 años de proyecto			30 años de proyecto		
	VAN [\$]	TIR	PRI [años]	VAN [\$]	TIR	PRI [años]
900	-84.847.037,3	-2%	Sin retorno	-39.652.921,4	-1%	Sin retorno
1000	-2.434.366,11	0%	Sin retorno	52.122.584,2	1%	22
1100	67.836.358,3	2%	16	127.059.354	2%	16
1200	150.249.030	3%	12	218.834.859	4%	13

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse, en este escenario los resultados mejoran significativamente, inclusive para un horizonte de evaluación de 20 años. De este modo, para un empresario es atractivo un proyecto

de este tipo, ya sea para 20 y 30 años de proyecto, obviamente con mejores resultados para éste último.

En el caso de 20 años de proyecto y un precio de venta del agua a 1200 [\$/m³], se logra alcanzar un VAN aproximado de 150M\$, con ganancias desde los 12 años en adelante. Sin embargo, el valor que alcanza el TIR es bastante bajo en comparación con la tasa de descuento utilizada de 11%.

Lo mismo ocurre en el caso de 30 años de proyecto y un precio de venta del agua a 1200 [\$/m³], en donde se alcanza un VAN aproximado de 218M\$ con ganancias desde los 13 años en adelante, pero un TIR que llega solamente al 4%.

Por un lado, en relación al VAN, el proyecto logra ser económicamente rentable para un empresario alcanzando altos valores. Pero por otro lado, en relación al TIR, los resultados no son muy llamativos, puesto que siempre se busca un TIR mayor a la tasa de descuento utilizada en el proyecto, cosa que no se cumple.

CONCLUSIONES

La realización de este proyecto se ha logrado llevar a cabo de manera correcta, y se han cumplido con los objetivos planteados en la sección 1.2. Estos objetivos, a grandes rasgos, corresponden a establecer parámetros de funcionamiento de una planta de osmosis inversa, alimentada con energía proveniente de un sistema ciclo Rankine orgánico solar, y comprobar si la instalación ha resultado rentable a lo largo de los años.

Según el análisis realizado en el CRO, sobre los fluidos de trabajo a utilizar en el ciclo, se ha llegado a la conclusión de que el tolueno resulta ser el más adecuado de todos ellos, alcanzando el mejor rendimiento en el ciclo. Además, según datos de seguridad y toxicidad analizados, el tolueno presenta índices muy adecuados para la seguridad de la planta y sus trabajadores, mostrando un límite de explosividad bajo y una temperatura de autoignición muy por sobre la máxima temperatura alcanzada en el ciclo. Finalmente, se tiene el respaldo de esta decisión tomada por las investigaciones realizadas en distintos casos, como por Agustín M. Delgado Torres en 2006 y por Joan Carles Bruno et al en 2007.

Realizado el análisis de radiación solar en las localidades en Chile, se ha decidido que la ciudad de Antofagasta y pueblos aledaños, sean los más adecuados. Otras ciudades que presentaron similares resultados fueron Arica e Iquique. La decisión final, se debe principalmente porque la zona de Antofagasta presenta índices de radiación y temperatura ambiente, más constante a lo largo del año que las otras ciudades. Así, no existiría una diferencia marcada entre la producción de verano a la producción de invierno.

Sobre el sistema de osmosis inversa, la decisión de implementar 3 escenarios de evaluación, ha nacido puesto que el proyecto en sí funcionando sólo con energía solar, no se obtienen resultados positivos de rentabilidad. Esto se debe principalmente al alto costo de inversión que conlleva la instalación de la planta solar, que no logra ser contrarrestado con la poca producción de agua dulce. Es así, que los escenarios 1, 2 y 3 tienen producciones de agua dulce de 121,5, 243 y 324 [m³/día] respectivamente.

Luego, en los resultados del análisis económico que se muestran en la sección 6.6 se observa que en el escenario 1 no se lograron resultados positivos en cuanto a rentabilidad en ninguno de sus casos. Tal como se menciona con anterioridad, esto se debe principalmente a la baja producción de agua

dulce como producto de venta. Por otro lado, el escenario que resulta más rentable es el 3 con un buen retorno de la inversión, tanto para 20 y 30 años de horizonte de evaluación.

De este modo, el proyecto de desalinización usando energía solar no resulta rentable si funciona sólo de esta forma. Sin embargo, éste logra una alta rentabilidad si funciona en conjunto con energía del SING, sin tener que estar deteniendo la planta durante horas de la noche.

Dentro de los valores más influyentes en el flujo de caja, está el valor de venta del agua producto. Esto significa, que a mayor precio por m³ de agua vendida, mayor será la rentabilidad. Esto implica que la selección de una localidad adecuada para la venta, repercute fuertemente en la rentabilidad del proyecto, siendo mejor para una localidad rural que urbana.

Uno de los factores que actualmente influye de forma negativa al proyecto, es el alto precio del tipo de cambio al Euro, estando éste con un valor de 765[\$/€], lo cual corresponde al valor del mes de Agosto del 2015 y que sigue en alza. En otro tiempo, donde el valor del Euro era menor, este proyecto se vería afectado directamente obteniéndose mejores resultados de rentabilidad.

Si bien el proyecto consta de una elevada inversión para la cantidad de agua a desalinizar, puede ser muy tentativo para las mineras en el norte de Chile, para abastecer de consumo de agua potable de una zona rural, con el objetivo de tener una buena responsabilidad social empresarial.

REFERENCIAS

- Agustín M. Delgado Torres. *Diseño preliminar de un sistema de desalación por ósmosis inversa mediante energía solar térmica*. Memoria para optar al grado de Doctor. La Laguna, España. Universidad de La Laguna, Depto. de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas, 2006. 369h.
- Joan Carles Bruno, Jesús López-Villada, Eduardo Letelier, Silvia Romera, Alberto Coronas. *Modelling and optimisation of solar organic Rankine cycle engines for reverse osmosis desalination*. Investigación. Tarragona, España. Universidad Rovira i Virgili, 2007. 15h.
- Marcelo Leonel Montes Siña. *Prefactibilidad técnica y económica de una planta desaladora de agua marina para la minería alimentada con energía generada por una planta de concentración solar*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Depto. de Ingeniería Industrial, 2011. 137h.
- Patricio Alejandro Soto Aravena. *Tecnologías para la desalinización, análisis y evaluación de caso*. Informe para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Concepción, Chile. Universidad del Bio-Bio, Depto. de Ingeniería Mecánica, 2013. 123h.
- Guido Soto Álvarez, Manuel Soto Benavides. *Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo*. Documento técnico del PHI-LAC N° 33. UNESCO, 2013. 71h.
- Nicolás Alejandro Carrasco Argomedo. *Caracterización de una planta termo solar de colectores parabólicos para generación de energía eléctrica*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Depto. de Ingeniería Eléctrica, 2009. 105h.
- Laia Sánchez-Junco Fiter. *Aplicación del ciclo orgánico de Rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería*. Proyecto para optar al título de Ingeniero en Minas. Madrid, España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Depto. de Ingeniería Química y Combustibles, 2012. 106h.

- César Antonio Echeverría López. *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. Tesis para optar al Título de Ingeniero Mecánico. Piura, Perú. Universidad de Piura, Área Departamental de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, 2011. 152h.
- Belén Gutiérrez López. *Recuperación de energía de la salmuera*. Tesis para optar al grado de Doctor. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid, 2012. 363h.
- Verónica María Martínez Saperas. *Estado del arte y evaluación técnica de la generación termosolar de electricidad*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Depto. de Ingeniería Química y Biotecnología, 2007. 103h.
- Roberto Leiva Illanes, Cynthia Herrera Reyes, Rafael Boloco. *Estudio de contribución de ERNC al SIC al 2025*, Informe final. Valparaíso, Chile. Universidad Técnica Federico Santa María, 2008. 91h.
- Hernán Romero D. Irradiancia solar en territorios de la República de Chile, Registro solarimétrico. Universidad Técnico Federico Santa María junto con el Gobierno de Chile, 2008. 249h.
- NIST (National Institute of Standards and Technology). Libro del Web de Química del NIST. [en línea] < <http://webbook.nist.gov/chemistry/> > [consulta: Marzo 2015].
- Gobierno de Chile. Instituto Nacional de Estadísticas. [en línea] < <http://www.ine.cl/> > [consulta: Abril 2015].
- Gobierno de Chile. Superintendencia de Servicios Sanitarios. [en línea] < <http://www.siss.gob.cl/> > [consulta: Junio 2015]
- Aguas Antofagasta. [en línea] < <http://www3.aguasantofagasta.cl/> > [consulta: Julio 2015].

ANEXOS

Anexo A

Tabla 1: temperaturas promedio mensuales para el año 2014 de las ciudades seleccionadas.

Meses	Temperatura promedio mensual (°C) año 2014							
	Arica	Iquique	Antofagasta	La Serena	Valparaíso	Concepción	Valdivia	Puerto Montt
Enero	21,9	20,8	19,6	18	17,7	16,8	18,8	15,9
Febrero	23	22,3	20,2	18	18,4	16,8	16,6	14,4
Marzo	21	19,8	17,7	15,1	15,3	14,2	13,6	12,4
Abril	18,1	17,5	15,3	13,3	14,1	13,1	11,9	11,2
Mayo	17,5	17,2	14,6	12,8	13,4	11,2	10,4	9,6
Junio	15,7	15,2	13,2	10,8	11,7	9,2	9,2	7,3
Julio	14,8	14,5	12,6	10,1	11,7	8,7	6,8	6,2
Agosto	15,5	14,8	13,7	11,1	12	8,8	7	6,1
Septiembre	16,3	15,8	14,2	12	12,2	10,2	8,1	7
Octubre	17,2	16,7	15	12,4	12,9	11,7	11	9,5
Noviembre	18,7	18,2	16,8	14,2	14,9	13,9	12,5	11,2
Diciembre	21	20,9	19,2	16,3	16,1	15,8	16,7	14

Tabla 2: datos relevantes de la ciudad de Antofagasta sobre la radiación solar.

Mes	Angulo	Dias			Indice	Radiación	Radiación	Radiación	
	inclinación	del		Meridiano	transparencia	horaria	sup.	sup.	
	panel	mes	Latitud	local	atmosférica	sup.	inclinada	inclinada	
	beta	días/mes	L	M_loc	K_t_mes	Inclinada	media	media	Duración
	[°]		[°]	[°]		I_ns_hora	dia, para el	total mes	día
							R_si_dia	R_si_mes	
						[kW/m ²]	[kWh/m ² ·día]	[kWh/m ² ·mes]	[horas]
Enero	-23	31	-3,4	-70,5	0,55	0,86	6,62	205,22	13,30
Febrero	-23	28	-3,4	-70,5	0,54	0,88	6,35	177,75	12,80
Marzo	-23	31	-3,4	-70,5	0,55	0,80	5,62	174,31	12,10
Abril	-23	30	-3,4	-70,5	0,53	0,69	4,47	134,18	11,50
Mayo	-23	31	-3,4	-70,5	0,46	0,64	3,40	105,41	10,90
Junio	-23	30	-3,4	-70,5	0,45	0,61	3,11	93,36	10,60
Julio	-23	31	-3,4	-70,5	0,43	0,65	3,18	98,52	10,70
Agosto	-23	31	-3,4	-70,5	0,49	0,70	4,04	125,35	11,20
Septiembre	-23	30	-3,4	-70,5	0,52	0,74	4,85	145,59	11,90
Octubre	-23	31	-3,4	-70,5	0,54	0,82	5,85	181,44	12,60
Noviembre	-23	30	-3,4	-70,5	0,56	0,86	6,58	197,38	13,10
Diciembre	-23	31	-3,4	-70,5	0,57	0,87	6,92	214,46	13,40
						0,76	5,08	154,41	

Tabla 3: Desarrollo del rendimiento del CCP LS-3 en la ciudad de Antofagasta

Mes	Dias/mes	Temperatura exterior	Rad. Total dia/mes	I ns hora
		⁰ C	[kw-h/m2 dia]	[kw/m2]
Enero	31	19,6	6,62	0,86
Febrero	28	20,2	6,35	0,88
Marzo	31	17,7	5,62	0,80
Abril	30	15,3	4,47	0,69
Mayo	31	14,6	3,40	0,64
Junio	30	13,2	3,11	0,61
Julio	31	12,6	3,18	0,65
Agosto	31	13,7	4,04	0,70
Septiembre	30	14,2	4,85	0,74
Octubre	31	15	5,85	0,82
Noviembre	30	16,8	6,58	0,86
Diciembre	31	19,2	6,92	0,87
			5,08	0,76

$(t_f - t_a)$	$(t_f - t_a)/I_{ns}$	$(t_f - t_a)^2/I_{ns}$	$(t_f - t_a)^3/I_{ns}$	Rendimiento colector
⁰ C	K m2/w	K2 m2/w	K3 m2/w	%
235,4	0,01039	2,4451	575,5819	72,2329
234,8	0,01020	2,3954	562,4500	72,2920
237,3	0,01125	2,6702	633,6397	71,9678
239,7	0,01319	3,1607	757,6219	71,3950
240,4	0,01438	3,4565	830,9381	71,0526
241,8	0,01507	3,6439	881,0990	70,8276
242,4	0,01422	3,4464	835,3980	71,0494
241,3	0,01322	3,1894	769,5975	71,3515
240,8	0,01235	2,9736	716,0503	71,6015
240,0	0,01117	2,6804	643,2869	71,9412
238,2	0,01061	2,5274	602,0275	72,1253
235,8	0,01040	2,4513	578,0177	72,2239
				71,6717

Anexo B

Flujos de caja realizados para todos los escenarios, mostrando el mejor de los casos.

Tabla 1: flujo de caja para escenario 1, caso 4 a 30 años.

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Venta de agua producto		53217000	54015255	54813510	55611765	56410020	57208275	58006530	58804785	59603040	60401295
Costos											
O&M Osmosis inversa		13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335
O&M Ciclo Rankine orgánico		3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
O&M Planta solar		8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
Total costos		25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835
Intereses préstamo											
Depreciación (-)		7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
Utilidad antes de impuesto		19796445	20594700	21392955	22191210	22989465	23787720	24585975	25384230	26182485	26980740
Impuesto		3959289	4118940	4278591	4438242	4597893	4757544	4917195	5076846	5236497	5396148
Utilidad después de impuesto		15837156	16475760	17114364	17752968	18391572	19030176	19668780	20307384	20945988	21584592
Depreciación (+)		7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
Inversión total	288252000										
Prestamo bancario											
Subsidio											
Amortización											
Valor residual											
Flujo de caja Neto	288252000	23523876	24162480	24801084	25439688	26078292	26716896	27355500	27994104	28632708	29271312
Valor actual	-288252000	21581537,61	20337076	19150987,4	18022116,3	16949100,5	15930412,2	14964395,3	14049296,8	13183294,2	12364518,5
Valor actual acumulado	-288252000	-266670462,4	-246333386	-227182399	-209160283	-192211182	-176280770	-161316375	-147267078	-134083784	-121719265

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
61199550	61997805	62796060	63594315	64392570	65190825	65989080	66787335	67585590	68383845	69182100	69980355	70778610	71576865
13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835
7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
27778995	28577250	29375505	30173760	30972015	31770270	32568525	33366780	34165035	34963290	35761545	36559800	37358055	38156310
5555799	5715450	5875101	6034752	6194403	6354054	6513705	6673356	6833007	6992658	7152309	7311960	7471611	7631262
22223196	22861800	23500404	24139008	24777612	25416216	26054820	26693424	27332028	27970632	28609236	29247840	29886444	30525048
7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
29909916	30548520	31187124	31825728	32464332	33102936	33741540	34380144	35018748	35657352	36295956	36934560	37573164	38211768
11591075	10861059,7	10172573,9	9523736,6	8912694,12	8337628,63	7796764,84	7288375,31	6810784,74	6362373,04	5941577,73	5546895,38	5176882,59	4830156,27
-110128190	-99267130,6	-89094556,7	-79570820,1	-70658126	-62320497,3	-54523732,5	-47235357,2	-40424572,4	-34062199,4	-28120621,7	-22573726,3	-17396843,7	-12566687,4

25	26	27	28	29	30
72375120	73173375	73971630	74769885	75568140	76366395
13570335	13570335	13570335	13570335	13570335	13570335
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
25733835	25733835	25733835	25733835	25733835	25733835
7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
38954565	39752820	40551075	41349330	42147585	42945840
7790913	7950564	8110215	8269866	8429517	8589168
31163652	31802256	32440860	33079464	33718068	34356672
7686720	7686720	7686720	7686720	7686720	7686720
38850372	39488976	40127580	40766184	41404788	42043392
4505393,55	4201331,26	3916765,09	3650548,46	3401591,24	3168858,22
-8061293,88	-3859962,62	56802,4702	3707350,93	7108942,18	10277800,4

Tabla 2: flujo de caja para escenario 2, caso 4 a 30 años.

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Venta de agua producto		106434000	108030510	109227893	110425275	111622658	112820040	114017423	115214805	116412188	117609570
Costos											
Consumo energía SING		13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600
O&M Osmosis inversa		20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5
O&M Ciclo Rankine orgánico		3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
O&M Planta solar		8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
Total costos		45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5
Intereses préstamo											
Depreciación (-)		11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
Utilidad antes de impuesto		49253917,5	50850427,5	52047810	53245192,5	54442575	55639957,5	56837340	58034722,5	59232105	60429487,5
Impuesto		9850783,5	10170085,5	10409562	10649038,5	10888515	11127991,5	11367468	11606944,5	11846421	12085897,5
Utilidad después de impuesto		39403134	40680342	41638248	42596154	43554060	44511966	45469872	46427778	47385684	48343590
Depreciación (+)		11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
Inversión total	436968000										
Prestamo bancario											
Subsidio											
Amortización											
Valor residual											
Flujo de caja Neto	436968000	51055614	52332822	53290728	54248634	55206540	56164446	57122352	58080258	59038164	59996070
Valor actual	-436968000	45996048,65	42474492,3	38965721	35735255,5	32762394,5	30027806,37	27513461,3	25202562,9	23079480,8	21129684,6
Valor actual acumulado	-436968000	-390971951,4	-348497459	-309531738	-273796482	-241034088	-211006281,6	-183492820	-158290257	-135210777	-114081092

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
118806953	120004335	121201718	122399100	123596483	124793865	125991248	127188630	128386013	129583395	130780778	131978160	133175543	134372925
13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600
20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5
11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
61626870	62824252,5	64021635	65219017,5	66416400	67613782,5	68811165	70008547,5	71205930	72403312,5	73600695	74798077,5	75995460	77192842,5
12325374	12564850,5	12804327	13043803,5	13283280	13522756,5	13762233	14001709,5	14241186	14480662,5	14720139	14959615,5	15199092	15438568,5
49301496	50259402	51217308	52175214	53133120	54091026	55048932	56006838	56964744	57922650	58880556	59838462	60796368	61754274
11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
60953976	61911882	62869788	63827694	64785600	65743506	66701412	67659318	68617224	69575130	70533036	71490942	72448848	73406754
19339679,5	17696943,3	16189866,7	14807694,7	13540472	12378989,7	11314735	10339844,3	9447057,25	8629675,21	7881520,75	7196900,3	6570568,88	5997697,11
-94741412,6	-77044469,2	-60854602,6	-46046907,9	-32506435,9	-20127446,2	-8812711,19	1527133,08	10974190,3	19603865,5	27485386,3	34682286,6	41252855,5	47250552,6

25	26	27	28	29	30
135570308	136767690	137965073	139162455	140359838	141557220
13008600	13008600	13008600	13008600	13008600	13008600
20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5	20355502,5
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5	45527602,5
11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
78390225	79587607,5	80784990	81982372,5	83179755	84377137,5
15678045	15917521,5	16156998	16396474,5	16635951	16875427,5
62712180	63670086	64627992	65585898	66543804	67501710
11652480	11652480	11652480	11652480	11652480	11652480
74364660	75322566	76280472	77238378	78196284	79154190
5473840,35	4994909,89	4557146,02	4157092,99	3791575,69	3457677,99
52724392,9	57719302,8	62276448,8	66433541,8	70225117,5	73682795,5

Tabla 3: flujo de caja para escenario 3, caso 4 a 30 años.

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos											
Venta de agua producto		141912000	144040680	145814580	147588480	149362380	151136280	152910180	154684080	156457980	158231880
Costos											
Consumo energía SING		20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500
O&M Osmosis inversa		18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780
O&M Ciclo Rankine orgánico		3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
O&M Planta solar		8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
Total costos		50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780
Intereses préstamo											
Depreciación (-)		14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
Utilidad antes de impuesto		76662900	78791580	80565480	82339380	84113280	85887180	87661080	89434980	91208880	92982780
Impuesto		15332580	15758316	16113096	16467876	16822656	17177436	17532216	17886996	18241776	18596556
Utilidad después de impuesto		61330320	63033264	64452384	65871504	67290624	68709744	70128864	71547984	72967104	74386224
Depreciación (+)		14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
Inversión total	536112000										
Préstamo bancario											
Subsidio											
Amortización											
Valor residual											
Flujo de caja Neto	536112000	75626640	77329584	78748704	80167824	81586944	83006064	84425184	85844304	87263424	88682544
Valor actual	-536112000	68132108,11	62762425,13	57580373,65	52809028,8	48417880,27	44378431,46	40664099,96	37250118,1	34113434,1	31232615,5
Valor actual acumulado	-536112000	-467979891,9	-405217466,8	-347637093,1	-294828064,3	-246410184	-202031752,6	-161367652,6	-124117535	-90004100,5	-58771484,9

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
160005780	161779680	163553580	165327480	167101380	168875280	170649180	172423080	174196980	175970880	177744780	179518680	181292580	183066480
20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500
18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780
14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
94756680	96530580	98304480	100078380	101852280	103626180	105400080	107173980	108947880	110721780	112495680	114269580	116043480	117817380
18951336	19306116	19660896	20015676	20370456	20725236	21080016	21434796	21789576	22144356	22499136	22853916	23208696	23563476
75805344	77224464	78643584	80062704	81481824	82900944	84320064	85739184	87158304	88577424	89996544	91415664	92834784	94253904
14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
90101664	91520784	92939904	94359024	95778144	97197264	98616384	100035504	101454624	102873744	104292864	105711984	107131104	108550224
28587754,6	26160376,3	23933350,19	21890805,2	20018048,4	18301487,1	16728555,2	15287643,5	13968032,9	12759832,4	11653920,2	10641888,2	9715990,2	8869093,49
-30183730,4	-4023354,1	19909996,09	41800801,3	61818849,7	80120336,8	96848892,1	112136536	126104568	138864401	150518321	161160209	170876199	179745293

25	26	27	28	29	30
184840380	186614280	188388180	190162080	191935980	193709880
20695500	20695500	20695500	20695500	20695500	20695500
18093780	18093780	18093780	18093780	18093780	18093780
3717900	3717900	3717900	3717900	3717900	3717900
8445600	8445600	8445600	8445600	8445600	8445600
50952780	50952780	50952780	50952780	50952780	50952780
14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
119591280	121365180	123139080	124912980	126686880	128460780
23918256	24273036	24627816	24982596	25337376	25692156
95673024	97092144	98511264	99930384	101349504	102768624
14296320	14296320	14296320	14296320	14296320	14296320
109969344	111388464	112807584	114226704	115645824	117064944
8094633,03	7386569,13	6739347,82	6147863,83	5607426,25	5113726,52
187839926	195226495	201965843	208113707	213721133	218834859