



Evaluación Económica entre Osmosis Inversa (RO) y Desalinización Solar Térmica

Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Fomento de la Energía Solar en Chile
(Enfoque en Tecnologías de Concentración Solar)

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröer / Rodrigo Vásquez

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:

Economic Assessment between Reserve Osmosis and Solar Thermal Desalination

Autor:

Dietmar Brakemeier, Tel: +49-711-8995-554
E-Mail: dietmar.brakemeier@fichtner.de

FICHTNER**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Fomento de la Energía Solar" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa Alemana de Tecnología para la mejora del Clima (DKTI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear (BMUB). Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 28 abril 2015

Índice

LISTA DE TABLAS:	4
LISTA DE FIGURAS:	5
GLOSARIO	6
ABREVIACIONES	7
1 RESUMEN	8
2 INTRODUCCIÓN / CONDICIONES BÁSICAS	10
2.1 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	11
2.2 SITIO DE REFERENCIA.....	11
2.3 DATOS METEOROLÓGICOS	13
2.3.1 Irradiación solar directa y global	13
2.3.2 Viento	14
2.3.3 Visión general del recurso solar en Chile.....	15
3 ESTADO DEL ARTE DE LA DESALINIZACIÓN	18
3.1 PLANTAS DESALINIZADORAS RO EN OPERACIÓN	19
3.2 PLANTA DE REFERENCIA	20
4 ALTERNATIVAS DE DESALINIZACIÓN SOLAR TÉRMICA	21
4.1 ALTERNATIVAS DE DESALINIZACIÓN SOLAR TÉRMICA	21
4.1.1 Desalinización térmica por MSF y MED.....	21
4.1.2 Descripción del proceso MSF	22
4.1.3 Descripción del proceso MED	22
4.1.3.1 MED “simple” y MED-TVC	24
4.1.3.2 Límites de temperatura	25
4.1.3.3 Coeficiente de rendimiento	26
4.1.3.4 La razón de ganancia salida (“gain output ratio GOR”)	27
4.1.3.5 Diseño de la unidad	27
4.2 VALOR DEL CALOR: ENFOQUE ELÉCTRICO EQUIVALENTE	27
4.3 PROCESOS MSF Y MED: CONCLUSIONES	28
4.4 COMPARACIÓN DE DATOS CLAVE TÉCNICOS Y FINANCIEROS DE TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN	29
4.4.1 Datos clave de diseño	29
4.4.2 Datos clave de energía.....	30
4.4.3 Datos clave de costos	30
4.4.3.1 Desembolsos operacionales (OPEX)	31
4.4.4 Conclusiones.....	33
4.5 ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA SOLAR.....	33
4.5.1 Tecnología de colectores solares	33
4.5.2 Fluido de transferencia de calor.....	37
4.5.3 Almacenamiento térmico de energía	39
4.6 QUEMADORES DE RESPALDO	42
5 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	43
5.1 CONCEPTOS Y CONFIGURACIONES DISPONIBLES.....	44
5.1.1 HTF sintético y acumulación con sal fundida	44
5.1.2 Vapor directo (operación MED continua).....	46
5.1.3 Vapor directo (Operación MED ciclada).....	47
5.1.4 Almacenamiento directo de aceite sintético.....	49
5.1.5 Almacenamiento directo de agua a presión.....	50
5.2 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN PARA LA EVALUACIÓN FINANCIERA	52

6 COMPARACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LOS CONCEPTOS SELECCIONADOS54

6.1	SUMINISTRO DE AGUA DE MAR AL SITIO DE DESALINIZACIÓN	54
6.2	PARÁMETROS TÉCNICOS CLAVE DE LOS CONCEPTOS SELECCIONADOS	56
6.3	PARÁMETROS FINANCIEROS CLAVE.....	57
6.4	RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS FINANCIERO	57
6.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	58
6.6	DESARROLLOS FUTUROS.....	59
6.7	EXACTITUD / INCERTIDUMBRE	60
6.8	CONCLUSIONES MÁS IMPORTANTES DEL ANÁLISIS FINANCIERO.....	61

Lista de Tablas:

Tabla 2-1:	Datos clave para la comparación (determinados por el Cliente)	11
Tabla 3-1:	Extracto de plantas RO en operación en Chile, con capacidades de producción de más de 10.000 m ³ /d	20
Tabla 3-2:	Datos clave de la planta RO de referencia	21
Tabla 4-1:	Tabla comparativa de características clave de MED y MSF	28
Tabla 4-2:	Datos clave de diseño	29
Tabla 4-3:	Datos clave de energía	30
Tabla 4-4:	CAPEX específico para la planta completa, incluyendo todas las instalaciones, edificios y sistemas, en US\$ / (m ³ /d)	31
Tabla 4-5:	Tabla comparativa de tecnologías seleccionadas	37
Tabla 4-6:	Límites, ventajas y desventajas de diferentes conceptos de almacenamiento	41
Tabla 6-1:	Datos clave para bombeo de agua de mar al sitio de desalinización solar	54
Tabla 6-2:	Demanda eléctrica incremental para bombear agua de mar al sitio de desalinización solar	55
Tabla 6-3:	Datos técnicos clave para los conceptos seleccionados	56
Tabla 6-4:	Parámetros financieros básicos	57
Tabla 6-5:	Resumen del análisis financiero	57
Tabla 6-6:	Resumen del análisis financiero – resultados sin costos de bombeo de agua de mar	58
Tabla 6-7:	Análisis de sensibilidad CAPEX	58
Tabla 6-8:	Análisis de sensibilidad OPEX	59
Tabla 6-9:	Estimaciones de exactitud / incertidumbre	60

Lista de Figuras:

Figura 2-1:	Perfil esquemático de elevación a través del Norte de Chile	12
Figura 2-2:	Sitio propuesto para la planta de desalinización solar y tubería indicativa desde la captación de agua de mar y hasta el consumidor (mina)	13
Figura 2-3:	Perfil de temperaturas medias mensuales en el sitio propuesto en °C	14
Figura 2-4:	Perfil medio mensual de velocidades de viento en el sitio propuesto, en m/s	15
Figura 2-5:	GeoModel Solar Atlas – Visión general del potencial de DNI en Chile	16
Figura 2-6:	Visión general del potencial de DNI en América latina y el Caribe	17
Figura 2-7:	Irradiación media global mensual en el sitio propuesto, en W/m ²	18
Figura 2-8:	Irradiación media mensual directa normal (DNI) en el sitio propuesto, en W/m ² ⁷	18
Figura 4-1:	Principio de operación de unidad MSF (Modo de una sola pasada)	22
Figura 4-2:	Principio de operación de una unidad MED-TVC	23
Figura 4-3:	Diagrama de proceso de un MED “simple” MED [Glade 2003]	24
Figura 4-4:	Diagrama de proceso de un MED-TVC [Gebel 2008]	25
Figura 4-5:	OPEX para tecnologías convencionales de desalinización (basado en datos de [GWI 2010a])	32
Figura 4-6:	Tecnologías solares para calor de proceso	34
Figura 4-7:	Concentrador parabólico compuesto (CPC)	35
Figura 4-8:	Colectores Fresnel lineales	35
Figura 4-9:	Canaletas parabólicas	36
Figura 4-10:	Almacenamiento de energía con sal fundida en dos estanques	40
Figura 5-1:	Tecnologías disponibles para subsistemas y posibles combinaciones	43
Figura 5-2:	Concepto A: HTF sintético y acumulación con sal fundida	44
Figura 5-3:	Configuración A: HTF sintético y acumulación con sal fundida	45
Figura 5-4:	Concepto B: Vapor directo, operación MED continua	46
Figura 5-5:	Configuración B: Vapor directo, operación MED continua	47
Figura 5-6:	Concepto C: Vapor directo, operación MED ciclada	48
Figura 5-7:	Configuración C: Vapor directo, operación MED ciclada	48
Figura 5-8:	Concepto D: Almacenamiento directo de aceite sintético	49
Figura 5-9:	Configuración D: Almacenamiento directa de aceite sintético	50
Figura 5-10:	Concepto E: Almacenamiento directo con agua a presión	51
Figura 5-11:	Configuración E: Almacenamiento directo con agua a presión	51
Figura 5-12:	Matriz de comparación para la selección de configuraciones	53

Glosario

Término	Explicación
Contrato de compra de energía (Power purchase agreement)	Un contrato de compra de energía (PPA) es un contrato entre una parte, que genera electricidad con el propósito de venderla, y una segunda parte que busca comprar esta electricidad.
Flotación por aire disuelto (Dissolved air flotation)	La flotación por aire disuelto (Dissolved air flotation DAF) asegura la separación líquido – sólido mediante el desplazamiento hacia arriba de partículas insolubles en agua. El principio es producir burbujas de aire que se adhieren a una partícula y la llevan a la superficie. El lodo (o espuma) se acumula en la parte de arriba y es retirado mediante raspado. El agua limpia puede ser recuperada en el fondo mediante tuberías perforadas.
Salmuera (Brine)	La salmuera es una solución de sal en agua. En este contexto se refiere al agua de descarte, que queda después de extraer el agua de producto.
Eutéctico	Del griego: eutēktos – fácilmente fundido. Describe una mezcla de sustancias (usada especialmente para aleaciones) que tiene el punto más bajo de solidificación de todas las posibles mezclas de las sustancias.

Abreviaciones

Nota: en esta traducción se conservan los términos en Inglés por ser de uso frecuente en la literatura especializada

Término	Explicación
CAPEX	Desembolso de capital (Capital expenditure)
OPEX	Desembolso de operación (Operational expenditure)
MSL	Nivel medio del mar (Mean sea level)
PPA	Contrato de compra de energía (Power purchase agreement)
DAF	Flotación por aire disuelto (Dissolved air flotation)
TDS	Sólidos totales disueltos (Total dissolved solids)
SEGS	Sistemas solares de generación de energía (Solar energy generating systems)
HSE	Salud, seguridad y medio ambiente (Health safety and environment)
DSG	Generación directa de vapor (Direct steam generation)
RO / SWRO	Osmosis inversa / osmosis inversa de agua de mar (Reverse osmosis / sea water reverse osmosis)
MED	Destilación multi efecto (Multi effect distillation)
MSF	Multistage flash (Multi etapa Flash)
LCOW	Costo nivelado de agua (Levelized cost of water)
I&C	Instrumentación y control
PV	Tecnología fotovoltaica (Photovoltaics)
DNI	Irradiación directa normal (Direct normal irradiation)
CPC	Conjunto de cilindro parabólico (Compound parabolic trough)
TVC	Compresión térmica de vapor (Thermal vapor compression)
TBT	Temperatura máxima de salmuera (Top brine temperature)
HTF	Fluido de transferencia de calor (Heat transfer fluid)
PR	Coefficiente de rendimiento (Performance ratio)

Término	Explicación
GOR	Razón de ganancia salida (Gain output ratio)
GWI	Global water intelligence
O&M	Operación y mantenimiento
LP	Baja presión (caldera) Low pressure (boiler)
DO	Operación diurna
CSP	Potencia solar concentrada (Concentrated solar power)
CST	Concentración solar térmica (Concentrated solar thermal)
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional)

1 Resumen

El Desierto de Atacama en el Norte de Chile es una de las regiones más secas del planeta. En la región existen diversas plantas de desalinización de agua de mar en operación para proveer de agua a la industria minera y a las ciudades.

Debido a que la región también dispone de una irradiación solar excepcional, la GIZ (“Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit”) asignó a Fichtner la tarea de investigar la posibilidad de usar tecnologías solar-térmicas en los procesos de desalinización de agua de mar.

La tarea apunta a comparar el costo nivelado de agua (LCOW) de una planta de desalinización utilizando tecnología solar-térmica de concentración con el costo nivelado de agua de una planta de osmosis inversa (RO) existente. A pesar de que las plantas RO son hoy en día técnicamente maduras y pueden proveer agua desalinizada a bajo costo, enfrentan sin embargo desafíos especiales en Chile, tales como ciertas impurezas del agua de mar. Esto puede provocar daños en las membranas de la planta, resultando en costos de operación más elevados (ver Capítulo 3).

El alcance de este estudio es elaborar posibilidades para desalinización solar térmica. Las tecnologías térmicas de desalinización incluyen plantas de destilación multi efecto (MED) y Multi etapa Súbita (MSF). Los trabajos al comienzo del estudio revelaron, que la tecnología MED es, en general, mejor para ser integrada en una planta solar térmica. Esto es debido a que las plantas MED son más eficientes que las plantas MSF, respecto al uso de energía eléctrica. Más aún, las plantas MED, especialmente si son implementadas sin compresión térmica de vapor (TVC), son menos sensibles a parámetros de vapor variables o incluso a partidas y detenciones diarias completas. Esta es una característica importante cuando las plantas se combinan con energía solar, debido a que la potencia térmica fluctuante es un asunto importante (ver Capítulo 4.1).

Existe una multitud de sistemas para entregar energía térmica a un proceso. Los colectores solares varían de sistemas con alta tasa de concentración para aplicaciones de alta temperatura a sistemas no-concentradores desarrollados para aplicaciones de calentamiento. También fueron investigados ampliamente los diferentes sistemas de almacenamiento térmico de energía y la integración de la energía solar al proceso (ver Capítulo 4.5).

Mediante la combinación sistemática de diferentes principios de operación de subsistemas, fueron identificados cinco conceptos generales para plantas de desalinización solar térmica. La implementación técnica de estos conceptos fue revisada combinando los componentes disponibles actualmente e identificando las configuraciones realizables.

Para continuar con el análisis financiero de los sistemas fue hecha una preselección, con el fin de enfocar el trabajo en configuraciones que parecían tener las mejores chances de proporcionar costos nivelados de agua competitivos (ver capítulo 5.2). Las tres configuraciones investigadas en más profundidad son:

1. Vapor directo (operación MED continua):

Esta configuración se caracteriza por la generación directa de vapor en el campo solar. La operación MED 24/7 es garantizada por la integración de una caldera suplementaria de vapor, quemando un combustible fósil.

2. Vapor directo (Operación MED ciclada):

En esta configuración la energía solar es recolectada de la misma manera que en la configuración 1. Debido a que no es implementada una solución de almacenamiento térmico de largo plazo y no se utiliza combustible fósil, la planta sólo opera cuando hay energía solar disponible. Por lo tanto toda el agua desalinizada debe ser producida durante el día y los subsistemas deben estar dimensionados correspondientemente.

3. Acumulación directa de agua a presión

En esta configuración se utilizan colectores no-concentradores o de baja concentración, operados con agua como medio de transferencia de calor. Es implementado un acumulador de agua a presión lo suficientemente grande para mantener operacional la MED en períodos sin radiación solar, asegurando una operación MED 24/7 sin un uso excesivo de quemadores de combustible fósil.

Fueron identificados parámetros técnicos clave para las configuraciones seleccionadas y fueron estimados los desembolsos de capital (CAPEX) y de operación (OPEX). Sobre esa base fue calculado el costo nivelado de agua, utilizando un análisis financiero simplificado. De las cifras calculadas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En el sitio seleccionado, la destilación solar térmica autónoma utilizando tecnología MED y tecnología solar personalizada no es competitiva en costo con la actual tecnología RO.
- Utilizando un sistema solar de generación directa de vapor en combinación con una caldera a petróleo diesel es un concepto económicamente mucho menos atractivo que aumentar la capacidad de MED y del campo solar, operando la planta sólo durante el día.
- Utilizar agua a presión como medio de transferencia de calor, incluyendo el almacenamiento directo de agua a presión promete alcanzar los mejores resultados económicos.

- Los grandes esfuerzos y costos asociados de bombear agua de mar a la meseta de montaña no son el factor decisivo o el más relevante al comparar conceptos de desalinización solar térmica con conceptos tecnológicos actuales de RO.
- Sin considerar los costos incrementales de bombeo de agua de mar, el CAPEX del concepto con agua a presión debería ser sólo un 30% de la estimación del Consultor, para lograr la paridad con la tecnología actual de RO.

Los resultados muestran que, por el momento, la desalinización solar térmica de agua de mar no es económicamente competitiva con el estado del arte de la desalinización por osmosis inversa. Los resultados dependen en gran medida del hecho que las plantas RO hoy en día son más rentables que las plantas de desalinización térmica. Se espera que el desarrollo tecnológico conduzca a una mayor rentabilidad de ambas tecnologías de desalinización, como también de la parte solar de la planta. Sin embargo, el desarrollo esperado favorece en mayor medida a la tecnología de osmosis inversa, porque aquí se espera una curva de aprendizaje más pronunciada. Hoy en día, Fichtner no ve potencial de desarrollo en MED y/o tecnología solar térmica de concentración a ser desplegado en el futuro cercano o a mediano plazo, que pueda cerrar efectivamente la brecha con respecto a la tecnología de desalinización de agua de mar por osmosis inversa.

En opinión del Consultor, el excepcional recurso solar del Desierto de Atacama constituye una excelente base para la aplicación de tecnologías solar térmicas. Por eso se espera que en el mediano plazo la generación eléctrica en centrales solar térmicas y fotovoltaicas serán un elemento esencial en el aseguramiento del suministro eléctrico en la región. Otro campo de aplicación muy promisorio será el suministro de calor de proceso desde plantas solar térmicas. El Consultor recomendaría, por lo tanto, realizar investigaciones complementarias en la región sobre:

- a) la situación de demanda y suministro eléctrico en el mediano plazo, así como
- b) las oportunidades de aplicaciones industriales de suministro de calor de proceso. Tales investigaciones deberían considerar, desde el comienzo, las características de la energía solar o del suministro de calor solar de proceso y describir las oportunidades a mediano plazo.

2 Introducción / condiciones básicas

El Norte de Chile es una de las regiones más secas del planeta. Por otro lado, la necesidad de agua de las municipalidades y de la industria minera ya es elevada y continuarán creciendo en el futuro. Debido a que la desalinización de agua de mar es la fuente más importante de agua en esta área, actualmente se utilizan plantas de osmosis inversa para producir agua desalinizada limpia. Dado que el Norte de Chile dispone de un recurso solar excepcional¹, el uso de procesos de desalinización con energía solar podría ser una excelente alternativa a las plantas existentes.

¹ Explorador del Recurso Solar en Chile - Documentación y Manual de Uso
http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/info/Documentacion_Explorador_Solar.pdf

2.1 Alcance del estudio

El propósito de este estudio es elaborar posibles conceptos de desalinización solar. Por otra parte, se entrega una comparación de aspectos técnicos y económicos con respecto a las actuales plantas de osmosis inversa en el Capítulo 6.

Como base de comparación se utilizan las características de plantas indicadas en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1: Datos clave para la comparación (determinados por el Cliente)

Capacidad de la planta	0,5 m³/s (43200 m³/d)
Distancia de la captación de agua de mar al consumidor	150 km
Altitud del consumidor	3000 m sobre el nivel medio del mar (MSL)
Período de operación	25 años
Costo del combustible	0,79 USD/litro de Diesel
Costo de la electricidad	120 USD/MWh (contrato PPA ²)
Tasa de descuento	8%

Basado en estos parámetros son determinados los costos de desarrollo, construcción y operación (CAPEX & OPEX) y comparados para ambas alternativas tecnológicas. Por otra parte se realiza un análisis de sensibilidad para mostrar el resultado del análisis financiero para variaciones de CAPEX y OPEX. Los resultados del estudio se resumen en una matriz de comparación.

2.2 Sitio de referencia

En comparación con plantas de osmosis inversa, las plantas solar térmicas tiene más restricciones con respecto al sitio de instalación. Para abastecer a un proceso con los parámetros definidos más arriba se requiere un campo solar con una superficie de aproximadamente 1000 por 1000 metros. El área del campo solar debe ser mayormente plana, porque de otra forma los costos de nivelado y preparación del terreno aumentarían dramáticamente, con el consiguiente impacto en el CAPEX de la planta solar.

La investigación de las condiciones geográficas en el Norte de Chile revelará, que un sitio plano suficientemente grande para albergar el campo solar con las dimensiones mencionadas no puede ser encontrado cerca de la costa. Observando el perfil de elevaciones Oeste – Este en el Norte de Chile, sólo es posible encontrar un área angosta con poca elevación cerca de la costa. Al desplazarse desde la costa en dirección Este, la altura se eleva abruptamente hasta una meseta a aprox. 1000 de altura sobre el nivel del mar. Esta meseta se extiende en dirección Este por 50 – 100 km hasta que la altura aumenta nuevamente en la cordillera de los Andes. Sólo fue posible encontrar un lugar adecuado para el campo solar en la meseta a unos 1.000 sobre el nivel del mar. La Figura 2-1 muestra un perfil esquemático de elevación en el Norte de Chile.

² Un contrato de compra de energía (PPA) es un contrato entre una parte, que genera electricidad con el propósito de venderla, y una segunda parte que busca comprar esta electricidad.

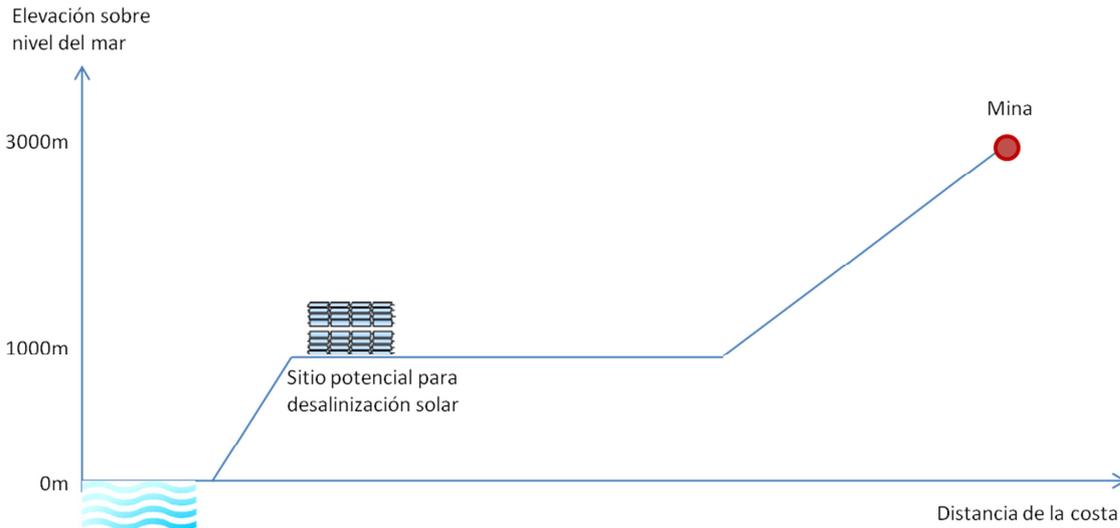


Figura 2-1: Perfil esquemático de elevación a través del Norte de Chile

En las tecnologías de desalinización térmica no es beneficioso separar substancialmente la fuente de suministro de energía respecto de la localización de la planta misma de desalinización. La energía térmica para el proceso de desalinización es suministrada normalmente por medio de vapor. Transportar vapor sobre grandes distancias implicaría tuberías aisladas de alto costo y aún así las pérdidas de calor serían substanciales.

Considerando lo anterior el Cliente sugirió un sitio para la planta de desalinización solar térmica. Se encontró un sitio apropiado para el campo solar y la planta desalinizadora cerca del aeródromo de Barriles, a 13 km al Este de Tocopilla (ver Figura 2-2). Dado que el sitio está situado a una altura de aprox. 1075 m sobre el nivel del mar, debe ser considerado el bombeo del agua de mar hasta el sitio. Esta materia es luego investigada en el Capítulo 6.1.



Figura 2-2: Sitio propuesto para la planta de desalinización solar y tubería indicativa desde la captación de agua de mar y hasta el consumidor (mina)³

2.3 Datos meteorológicos

2.3.1 Irradiación solar directa y global

La suma anual de la irradiación disponible en un sitio específico es un criterio importante. Para tecnologías de concentración solar la irradiación directa normal es una variable clave, mientras que para tecnologías no-concentradoras, incluyendo la fotovoltaica, lo es la irradiación global.

La sensibilidad del rendimiento energético anual a la irradiación directa normal (sistemas concentradores) es más o menos lineal. Esto significa, que 10% menos de irradiación en un sitio, comparado con otro sitio, resulta en aprox. 10% menos de energía anual producida⁴.

Además de las sumas anuales, también deben ser evaluados los perfiles de irradiación estacionales y diarios. La producción de una planta solar térmica es también una función de muchas otras variables meteorológicas. Esto incluye, por ejemplo, la posición del sol (altura sobre el horizonte y azimut); la temperatura ambiente (relevante para enfriadores de condensación o pérdidas de calor del campo solar) o las velocidades de viento (producción reducida a mayores velocidades de viento). Por lo tanto, podría ser necesario evaluar los perfiles de irradiación solar contra otros factores de mayor influencia, con el fin de identificar efectos positivos o negativos derivados de su coincidencia e interacción. Un ejemplo podría ser

³ Fuente: Google Earth

⁴ Referencia: W. B. Stine and R. W. Harrigan - Solar Energy Fundamentals and Design

la coincidencia de la irradiación solar y de la posición del sol. Si la mayor parte de la irradiación es recibida en períodos de bajo ángulo solar (altitud), la producción anual se reduce por pérdidas geométricas, las llamadas pérdidas del coseno.

Especialmente para proyectos de generación eléctrica solar, las temperaturas ambientes y sus perfiles estacionales y diarios son un factor importante para la performance anual. Esto es porque la eficiencia del ciclo de vapor de la turbina disminuye a mayores temperaturas ambientes. Para el suministro de calor de proceso con tecnologías solar térmicas, las altas temperaturas ambientes no son tan problemáticas, como los son para la generación eléctrica.

Temperaturas extremas podrían hacer necesarias medidas técnicas que podrían afectar la economía de la planta en un sitio en relación a otro. Los ejemplos podrían ser requerimientos de protección contra congelamiento o temperaturas de diseño para equipos eléctricos y de I&C de campo. Esto se refiere tanto a temperaturas extremas frías, como calientes.

Como se muestra en la Figura 2-3, el sitio propuesto tiene un clima moderado con bajas variaciones estacionales. Esto apoya la selección de temperaturas apropiadas de diseño y reduce pérdidas por operación fuera de los límites de diseño.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00 - 01:00	15.22	16.39	16.1	13.52	13.3	12.15	8.03	12.1	12.27	12.14	13.04	13.14
01:00 - 02:00	14.88	15.95	15.51	13.04	12.95	11.88	7.77	11.85	11.98	11.94	12.71	12.85
02:00 - 03:00	14.5	15.56	14.94	12.56	12.57	11.54	7.44	11.55	11.55	11.62	12.32	12.52
03:00 - 04:00	14.22	15.3	14.61	12.09	12.34	11.35	7.17	11.18	11.08	11.22	11.83	12.15
04:00 - 05:00	13.92	15.01	14.27	11.74	12.13	11.16	6.89	10.88	10.82	11.13	11.61	11.81
05:00 - 06:00	13.88	14.92	14.15	11.77	12.09	11.05	6.69	10.78	10.76	11.08	11.57	11.78
06:00 - 07:00	13.98	14.94	14.14	11.81	12.09	11	6.73	10.71	10.68	11.03	11.64	11.86
07:00 - 08:00	15.24	15.73	14.55	12.01	12.16	11.02	6.73	10.75	10.97	11.8	12.92	13.54
08:00 - 09:00	18.85	18.9	17.46	14.18	13.26	11.83	7.86	12.48	13.86	15.49	16.71	17.44
09:00 - 10:00	21.95	21.9	21.13	18.43	16.48	15.02	12.35	16.78	18.26	19.52	20.3	20.68
10:00 - 11:00	23.45	23.49	23.3	21.79	19.67	18.55	17	20.62	21.33	21.79	22.09	22.17
11:00 - 12:00	23.83	23.83	23.51	22.81	21.26	20.46	19.45	22.29	22.27	22.21	22.32	22.36
12:00 - 13:00	24.22	24.25	23.89	22.77	21.51	20.79	19.79	22.42	22.32	22.28	22.61	22.66
13:00 - 14:00	24.34	24.55	24.15	22.59	21.4	20.6	19.55	22.2	22.31	22.32	22.81	22.84
14:00 - 15:00	24.12	24.45	24.17	22.5	21.17	20.3	19.28	21.8	22.06	22.14	22.62	22.64
15:00 - 16:00	23.7	23.96	23.77	22.22	20.7	19.74	18.81	21.15	21.59	21.79	22.3	22.27
16:00 - 17:00	22.9	22.98	22.69	21.62	19.82	18.71	18.08	20.25	20.82	21.02	21.62	21.49
17:00 - 18:00	21.83	21.73	21.3	20.7	18.56	17.33	17.05	19.03	19.64	19.86	20.48	20.33
18:00 - 19:00	20.55	20.51	19.88	19.42	17.05	15.71	15.04	17.23	17.99	18.32	19.05	18.86
19:00 - 20:00	19.01	19.08	18.41	17.61	15.6	14.43	12.63	15.02	15.79	16.33	17.2	17.17
20:00 - 21:00	17.52	18.15	17.54	16.11	14.81	13.63	10.49	13.83	14.25	14.62	15.43	15.55
21:00 - 22:00	16.5	17.47	17.06	14.84	14.18	12.99	9	12.96	13.45	13.62	14.39	14.51
22:00 - 23:00	15.98	17.08	16.86	14.07	13.67	12.64	8.37	12.51	13.03	12.97	13.75	13.97
23:00 - 24:00	15.56	16.75	16.64	13.8	13.5	12.38	8.12	12.24	12.7	12.54	13.26	13.5

Figura 2-3: Perfil de temperaturas medias mensuales en el sitio propuesto en °C⁵

2.3.2 Viento

Las velocidades de viento y sus perfiles estacionales y diarios son relevantes para la producción anual de la planta, así como para las cargas de diseño. Este efecto es particularmente fuerte para plantas con colectores cilindro parabólicos y receptores centrales.

El rendimiento óptico y térmico de sistemas solares térmicos es influenciado por el viento. A mayores velocidades de viento se reduce la exactitud óptica debida a vibraciones y aumentan las pérdidas por convección. Las cargas extremas de viento (por ejemplo sobre 25 m/s) podrían hacer necesaria la detención temporal de la planta por razones de seguridad.

Para cada sitio el diseño estructural de los colectores está basado en las velocidades máximas esperadas de ráfagas de viento. La probabilidad de condiciones extremas de tiempo, como huracanes, podría requerir diseños de alta resistencia estructural, los cuales evidentemente harían aumentar los costos de capital.

⁵ Fuente: Explorador de Energía Solar del Ministerio de Energía

Los sistemas sin seguimiento (tracking) y sistemas no-concentradores son menos vulnerables a cargas de viento que los sistemas más grandes con reflector térmico. La influencia del viento sobre su performance es insignificante. Las velocidades de ráfagas de viento son relevantes para el diseño estructural, es decir la estructura de soporte de paneles y las fundaciones.

Basado en los datos proporcionados para el sitio, las velocidades de viento no parecen ser algo importante. Sólo en las tardes las velocidades de viento aumentan a valores ligeramente mayores. Deberían considerarse investigaciones adicionales sobre la velocidad de ráfagas de viento si el sitio es analizado a nivel de estudio de factibilidad.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00 - 01:00	2.54	2.48	2.28	2.8	2.8	2.92	3.39	3.39	3.29	3.1	3.11	2.65
01:00 - 02:00	2.46	2.41	2.22	2.82	3	3.01	3.48	3.67	3.45	3.24	3.07	2.57
02:00 - 03:00	2.78	2.45	2.2	2.82	3.14	3.1	3.5	3.67	3.53	3.42	3.21	2.82
03:00 - 04:00	3.21	2.43	2.41	3	3.29	3.3	3.67	3.66	3.59	3.69	3.52	3.47
04:00 - 05:00	3.46	2.84	2.63	3.18	3.38	3.4	3.62	3.56	3.61	3.94	3.85	3.75
05:00 - 06:00	3.66	3.16	3.09	3.64	3.46	3.47	3.77	3.64	3.67	3.95	3.95	3.91
06:00 - 07:00	3.68	3.28	3.23	3.9	3.64	3.55	3.94	3.68	3.67	3.97	4	3.95
07:00 - 08:00	3.55	3.25	3.36	4.03	3.67	3.64	4	3.65	3.64	4.1	4.11	3.93
08:00 - 09:00	3.64	3.36	3.46	4.07	3.53	3.59	4.03	3.65	3.57	4.15	4.1	4.01
09:00 - 10:00	2.2	2.66	3.14	3.7	3.44	3.39	3.97	3.88	3.53	3.32	2.76	2.5
10:00 - 11:00	3.94	3.75	3.3	2.65	2.94	3.03	3.46	3.29	2.83	3.43	3.85	4.33
11:00 - 12:00	6.19	6.12	5.73	4.1	3.25	3.07	2.84	3.69	4.95	5.99	6.25	6.49
12:00 - 13:00	7	6.98	6.91	5.77	4.92	4.79	4.92	5.68	6.58	7.12	7.05	7.22
13:00 - 14:00	7.22	7.1	7.19	6.56	5.78	5.78	6.04	6.68	7.06	7.4	7.35	7.45
14:00 - 15:00	7.24	7.14	7.24	6.69	5.94	6.08	6.22	6.72	7.02	7.2	7.31	7.37
15:00 - 16:00	7.11	7.05	7.21	6.44	5.73	5.8	6	6.39	6.6	6.65	7.01	7.18
16:00 - 17:00	6.79	6.67	6.85	5.85	5.07	5.05	5.23	5.78	5.96	6.08	6.52	6.88
17:00 - 18:00	6.15	6.09	6.18	4.88	3.85	3.74	4.11	4.77	5.15	5.38	5.81	6.28
18:00 - 19:00	5.15	5.06	4.94	3.58	2.37	2.19	2.57	3.03	3.71	4.32	4.85	5.39
19:00 - 20:00	3.75	3.4	2.8	2.26	2.09	2.08	1.68	2.07	2.09	2.61	3.33	3.95
20:00 - 21:00	1.98	1.93	1.86	1.65	2.34	2.32	1.99	2.42	2.46	2.15	2.12	1.98
21:00 - 22:00	2.18	2.12	2.1	1.79	2.36	2.4	2.37	2.64	2.75	2.52	2.38	2.1
22:00 - 23:00	2.56	2.42	2.37	2.14	2.58	2.69	2.81	3.04	2.9	2.65	2.58	2.4
23:00 - 24:00	2.75	2.5	2.4	2.59	2.69	2.81	3.13	3.32	3.21	2.96	2.98	2.69

Figura 2-4: Perfil medio mensual de velocidades de viento en el sitio propuesto, en m/s⁶

2.3.3 Visión general del recurso solar en Chile

La irradiación directa normal (DNI) es influenciada por diversos factores. La reflexión, absorción y dispersión en la atmósfera conducen a atenuar la irradiación directa normal. El factor más importante que determina el potencial es la atenuación en la baja atmósfera. Esto se debe principalmente al polvo y la humedad. Si se conjugan estos factores, la irradiación directa normal disponible se reduce dramáticamente.

La elevación sobre el nivel del mar juega un rol, dado que ejerce influencia sobre la atenuación atmosférica de varias maneras. En primer lugar los rayos solares recorren un camino más corto a través de la atmósfera y segundo, los sitios elevados son normalmente menos húmedos que los sitios a menor altura o cerca del mar.

El Norte de Chile tiene condiciones ideales para plantas solar térmicas. Con sus altos niveles de irradiación, Chile tiene uno de los mayores potenciales para sistemas de conversión de energía solar en el planeta.

⁶ Fuente: Explorador de Energía Solar del Ministerio de Energía

La irradiación directa normal (DNI) llega a 3500 kWh/m² por año en algunos lugares, como se muestra en el mapa de la Figura 2-5.

Direct Normal Irradiation (DNI) Chile Mainlands



Figura 2-5: GeoModel Solar Atlas – Visión general del potencial de DNI en Chile

La Figura 2-6 muestra la irradiación directa normal (DNI) en América Latina y el Caribe. El mapa pone en perspectiva la excelente condición de irradiación directa normal en el Norte de Chile, en relación con otros países latinoamericanos y caribeños.

Direct Normal Irradiation (DNI) Latin America and the Caribbean



Figura 2-6: Visión general del potencial de DNI en América latina y el Caribe

La Figura 2-8 representa la irradiación media global mensual en Barriles, Chile. La Figura 2-7 muestra los valores de la irradiación directa normal en el mismo sitio. Los datos para ambas figuras fueron proporcionados por el Cliente. Junio y Julio son los meses con los valores más bajos, y Noviembre y Diciembre con los valores más altos.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00 - 01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00 - 02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00 - 03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00 - 04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00 - 05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00 - 06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00 - 07:00	166.56	47.5	3.26	0	0	0	0	0	27.27	220.02	379.18	311.24
07:00 - 08:00	605.14	492.7	464.34	317.03	204.74	105.09	103.2	241.18	498.8	693.07	755.45	675.52
08:00 - 09:00	786.88	704.46	777.28	705.47	661.25	591.91	607.17	702.09	781.72	861.13	890.48	816.98
09:00 - 10:00	919.12	810.52	894.72	845.88	817.99	783.55	795.42	855.16	907.04	949.52	966.73	917.57
10:00 - 11:00	974.37	907.49	956.06	904.22	885.52	868.05	860.44	925.25	962.66	994.61	1002.5	965.56
11:00 - 12:00	982.52	954	984.91	927.77	925.17	904.17	906.23	964.92	989.32	1014.72	1020.77	995.65
12:00 - 13:00	987.57	973.04	996.89	940.53	927.69	918.16	928.56	977.71	992.18	1021.05	1026.48	1000.97
13:00 - 14:00	997.25	992.24	995.49	942.74	923.59	924.22	926.13	970.15	985.21	1015.25	1020.06	994.99
14:00 - 15:00	976.17	980.34	980.31	939.56	898.33	907.31	891.69	940.62	966.29	995.83	996.26	987.38
15:00 - 16:00	949.67	930.07	946.76	892.74	848.73	847.05	838.99	897.15	924.33	957	948.26	942.97
16:00 - 17:00	899.64	878.8	880.55	804.56	743.91	726.8	745.61	815.79	841.68	881.82	880.6	885.8
17:00 - 18:00	781.28	754.42	735.84	589.9	448.16	420.63	489.46	599.42	652.53	714.51	757.35	771.13
18:00 - 19:00	551.44	493.78	327.86	89.43	5.11	0	19.31	81.91	141.83	232.36	381.83	517.34
19:00 - 20:00	84.59	24.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29.13
20:00 - 21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00 - 22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00 - 23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00 - 24:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2-7: Irradiación media global mensual en el sitio propuesto, en W/m^2 ⁷

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00 - 01:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00 - 02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00 - 03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00 - 04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00 - 05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00 - 06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00 - 07:00	32,98	8,17	1,13	0	0	0	0	0	5,31	43,64	86,47	72,69
07:00 - 08:00	217,82	151,58	118,75	76,62	42,78	20,27	19,74	52,44	141,62	255,36	316,97	282,2
08:00 - 09:00	455,11	377,93	359,44	295,84	233,95	182,24	187,04	261,31	382,14	503,97	561,34	512,26
09:00 - 10:00	695,02	600,64	596,14	519	440,63	381,5	392,13	484,14	617,68	733,05	782,75	735,28
10:00 - 11:00	886,44	811,11	794,9	697,43	609,56	549,88	561,2	670,41	804,87	912,64	953,13	909,94
11:00 - 12:00	1007,4	961,56	933	816,79	726,48	663,24	685,82	801,89	929,21	1025,77	1061,39	1028,73
12:00 - 13:00	1067,14	1040,05	1000,75	872,04	769,93	714,4	747,76	861,61	976,64	1065,61	1098,92	1075,08
13:00 - 14:00	1068,28	1051,59	992,65	857,8	749,2	703,91	738,85	845,99	949,07	1029,01	1062,5	1051,27
14:00 - 15:00	986,24	976,36	909,34	778,85	659,88	625,07	654,82	755,7	851,04	918,88	952,81	970,38
15:00 - 16:00	846,06	821,96	757,61	621,59	512,17	480,45	514,44	605,94	685,26	744,2	777,51	812,36
16:00 - 17:00	653,16	626,65	550,24	416,64	319,34	292,19	331,28	407,54	468,24	519,8	561,25	611,08
17:00 - 18:00	416,81	386,99	307,16	185,85	109,41	94,68	126,1	179,7	224,65	268,24	321,69	377,89
18:00 - 19:00	177,83	146,78	76,95	16,83	1,29	0,18	3,67	13,84	27,46	48,37	90,57	147,36
19:00 - 20:00	15,67	6,07	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,28	6,92
20:00 - 21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00 - 22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00 - 23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00 - 24:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2-8: Irradiación media mensual directa normal (DNI) en el sitio propuesto, en W/m^2 ⁷

3 Estado del arte de la desalinización

La tecnología de osmosis inversa basada en membranas permite el paso de agua fresca reteniendo los iones, los elementos básicos de la sal. En consecuencia el agua de alimentación es dividida en una corriente de agua muy pura (permeado) y una corriente que contiene los iones rechazados (concentrado o salmuera). La salmuera conteniendo una concentración elevada de iones rechazados es devuelta al mar. La razón típica de recuperación, es decir, el flujo de permeado relativo al flujo de agua de mar que ingresa a la sección de osmosis inversa, es de 40% a 45%, dependiendo de la salinidad del agua de mar. A

⁷ Fuente: Explorador de Energía Solar del Ministerio de Energía

mayor contenido de sal se requiere mayor presión de trabajo, reduciendo la recuperación posible de permeado (razón permeado a alimentación).

La fuerza impulsora del proceso de osmosis inversa es la presión. Mientras mayor es la salinidad del agua de alimentación y menor su temperatura, se requiere más presión. Normalmente la presión es generada por una bomba con accionamiento eléctrico, llamada bomba de alta presión, entregando típicamente 55 a 75 bar. Así el proceso de osmosis inversa de agua de mar (SWRO) puede ser operado sólo con electricidad y por lo tanto es bastante independiente, pudiendo ser implementado como planta autónoma. Las actuales plantas SWRO de alta eficiencia recuperan energía contenida en el concentrado por medio de sistemas recuperadores de energía.

3.1 Plantas desalinizadoras RO en operación

En Chile hay diversas plantas de SWRO en operación para producir agua potable, principalmente para satisfacer la demanda de la industrial minera.

Las plantas RO son muy sensibles a impurezas en el agua de alimentación, por lo que se requiere de sistemas adecuados de pre-tratamiento de agua para eliminar las impurezas. Por consiguiente, las condiciones específicas del agua de mar en el sitio del proyecto influirán en el diseño y los costos del sistema de pre-tratamiento. Si se opta por captación directa de agua de mar, el sistema de pre-tratamiento anterior a la osmosis inversa se vuelve más intensivo e importante.

Los sistemas de pre-tratamiento de plantas desalinizadoras RO deben eliminar basuras, sólidos suspendidos y/o materia orgánica a fin de prevenir el excesivo ensuciamiento biológico e incrustaciones en la primera etapa de la sección de osmosis inversa.

No debería subestimarse la importancia de un adecuado pre-tratamiento, dado que el ensuciamiento biológico excesivo y las incrustaciones podrían afectar seriamente los esfuerzos de limpieza de las membranas y por lo tanto la disponibilidad de la planta, los costos operacionales y la frecuencia de reemplazo de las membranas.

El ensuciamiento y las incrustaciones siguen siendo el asunto técnico primario en los sistemas RO. El ensuciamiento se refiere a depósitos de materiales en la membrana, distinguiéndose varios tipos, como partículas, material biológico, etc. Las incrustaciones, por su parte, se refieren a depósitos de "materia dura" en los sistemas de membrana, debido a la precipitación de sales. Un tratamiento inadecuado o inapropiado puede conducir al ensuciamiento y a incrustaciones en la membrana, ocasionando una disminución del flujo a través de la membrana (menor producción de agua limpia), un deterioro de la calidad del agua producida o, en casos severos, la pérdida de costosos elementos de membrana. Para mantener la producción es aumentada la presión de trabajo, con el consiguiente aumento del costo de la energía y, en caso de ser necesaria la limpieza de las membranas para restablecer la productividad, aumenta también el uso de productos químicos y el tiempo de paralización. La excesiva limpieza de las membranas acortará también su vida útil, con el consiguiente aumento de la frecuencia de reemplazo.

Si se anticipan períodos de floración de algas a lo largo de la costa chilena, las plantas SWRO modernas instalan unidades de flotación de aire disuelto (DAF)⁸ en la sección de pre-

⁸ La flotación de aire disuelto (DAF) la separación asegura la separación de líquido – sólido por el desplazamiento hacia arriba de partículas insolubles en agua. El principio es producir burbujas de aire que se unen a la partícula y la llevan a la superficie. El lodo acumulado en la superficie es removido por raspado. El agua limpia puede ser captada en el fondo mediante tuberías perforadas.

tratamiento, para hacer frente a cantidades significativamente mayores de sólidos orgánicos e inorgánicos que pueden estar presentes en el agua de mar en esos períodos. El sistema DAF debe estar dimensionado para proteger los filtros y membranas aguas abajo durante las esperadas floraciones de algas.

La tecnología SWRO proporciona flexibilidad en cuanto a la ubicación de la planta, independiente de la central eléctrica y también en cuanto a la capacidad de diseño de la planta. Sin embargo, para operar una planta SWRO con energía solar se requeriría implementar un ciclo eléctrico a partir de calor solar. A pesar de que esto es posible, esta configuración se presta más para proyectos en que el objetivo principal es la generación eléctrica conectada a la red y el proceso de desalinización es un subproducto.

La tabla de más abajo muestra un extracto de plantas desalinizadoras RO en operación, con capacidades de producción de más de 10.000 m³/d.

Tabla 3-1: Extracto de plantas RO en operación en Chile, con capacidades de producción de más de 10.000 m³/d⁹

Lugar	Nombre del proyecto	Producción de agua (m ³ /d)	Fecha de puesta en marcha	Categoría de usuario
Antofagasta	Antofagasta SWRO (OHL)	52.000	2002	Municipalidades como agua potable (TDS ¹⁰ 10 ppm - <1000 ppm)
Minera Escondida	Minera Escondida	45.000	2006	Industria (TDS <10 ppm)
Copiapó	Punta Totoralillo	34.560	2013	Industria (TDS <10 ppm)
Caldera	Punta Padrones	29.800	2013	Industria (TDS <10 ppm)

3.2 Planta de referencia

Hasta el día de hoy el Consultor no pudo acceder a los datos esenciales relativos a operación y costos de la planta RO (por ejemplo CAPEX, OPEX, costos unitarios de producción de agua), que se requieren para esta evaluación.

Con el fin de avanzar con la evaluación, Fichtner sugiere substituir los datos clave pendientes por datos clave de dominio público disponibles de otras plantas RO en Chile con similares características técnicas.

En base a la información que dispone el Consultor, varias plantas RO existentes serían adecuadas para ser seleccionadas como referencia para el análisis. Desafortunadamente los datos comerciales específicos del proyecto, así como especificaciones técnicas que no son de dominio público, no pueden ser informados por el Consultor por ser confidenciales.

En la **Sección 4.4** el Consultor resume las cifras esenciales de costo y performance aplicables a las más importantes tecnologías de desalinización, incluyendo la tecnología RO.

⁹ Fuente: GWI / <http://DesalData.com>

¹⁰ TDS: Sólidos totales disueltos (Total dissolved solids)

En base al conocimiento general del Consultor sobre la industria de la desalinización, al conocimiento de información particular del sector de desalinización en Chile, así como del tamaño de la planta a ser considerada como referencia para la evaluación (45.000 m³/d), el Consultor propone utilizar las siguientes cifras características de performance y de costos como “benchmark” para la tecnología RO existente:

Tabla 3-2: Datos clave de la planta RO de referencia

Parámetro	Unidad	Valor
Producción diaria	m ³ /d	45.000
Tecnología	-	RO, pre-tratamiento local específico
Consumo de energía eléctrica	kWh/m ³	4,0
CAPEX	US\$/ m ³ /d	1.300
OPEX (costos fijos, excluido electricidad)	US\$/m ³	0,25

4 Alternativas de Desalinización Solar Térmica

Las tecnologías solar térmicas usan la radiación del sol para captar calor en un fluido de proceso – el llamado fluido de transferencia de calor – (HTF). La energía térmica de este fluido puede luego ser proporcionada a cualquier tipo de proceso, por ejemplo a una central eléctrica o a una planta de desalinización. Se dispone de diferentes tecnologías para los subsistemas, cada una con su mejor eficiencia de costos a diferentes parámetros de proceso. Para satisfacer los requerimientos del proceso, con el mejor rendimiento técnico-económico, los subsistemas deben ser combinados en configuraciones que pueden ser luego evaluadas como un todo. En los capítulos siguientes se investigan posibles tecnologías solares y de desalinización y cómo éstas pueden ser implementadas conjuntamente.

4.1 Alternativas de desalinización solar térmica

Al contrario de la desalinización con membranas (SWRO), las plantas de desalinización solar térmica, como MSF, MED, MED-TVC, requieren, además de energía eléctrica (para accionar bombas) de energía térmica en forma de vapor de baja presión. Para el suministro de energía térmica se puede usar una conexión directa con tecnologías solar térmicas. Para operar plantas RO con energía solar térmica es necesario implementar un ciclo de generación eléctrica a partir de calor solar. A pesar de que esto es posible, esta configuración se presta más para proyectos en que el objetivo principal es la generación eléctrica conectada a la red y el proceso de desalinización es un subproducto.

4.1.1 Desalinización térmica por MSF y MED

Las tecnologías convencionales de desalinización térmica, la destilación multi-etapas flash (**MSF**) y la destilación multi-efecto (**MED**) requieren de energía térmica (calor), la que normalmente se genera externamente con ayuda de plantas de cogeneración o centrales eléctricas. A continuación se destaca el principio de operación de la desalinización térmica por MSF y MED y se aportan datos de diseño y operación para su comparación con la tecnología RO.

4.1.2 Descripción del proceso MSF

En el proceso de destilación multi-etapas flash (**MSF**), el agua salada es destilada por medio de evaporación y posterior condensación. El calor requerido para este proceso se extrae típicamente como vapor del ciclo agua – vapor de una central termoeléctrica.

En la Figura 4-1 se muestra el principio de operación de un proceso MSF. El flujo de agua de mar ingresa a la unidad MSF en la última etapa *fría* y fluye a través de los intercambiadores tubulares de calor (pre-calentador) de todas las etapas hasta el calentador de salmuera¹¹. Aquí se usa calor externo (vapor) para calentar el agua de mar hasta la temperatura máxima de salmuera (TBT). En esta condición el agua de mar es liberada para fluir de regreso a través de los compartimentos flash de las etapas consecutivas. El patrón de flujo y la presión decreciente gradualmente hacen que el agua hierva instantánea y vigorosamente (en otras palabras “flash”) al entrar en cada etapa. El vapor generado pasa a través dispositivos antivaho (“demisters”) y condensa en la superficie exterior de los pre-calentadores, transfiriendo así su calor latente al agua de mar más fría. El condensado es recogido en canaletas de destilado y extraído de la última etapa.

Comparado con un proceso MED, un proceso MSF requiere aproximadamente el doble de energía eléctrica (3 a 5 kWh/m³), debido a la gran longitud de las tuberías de pre-calentamiento a través de las cuales debe circular el concentrado.

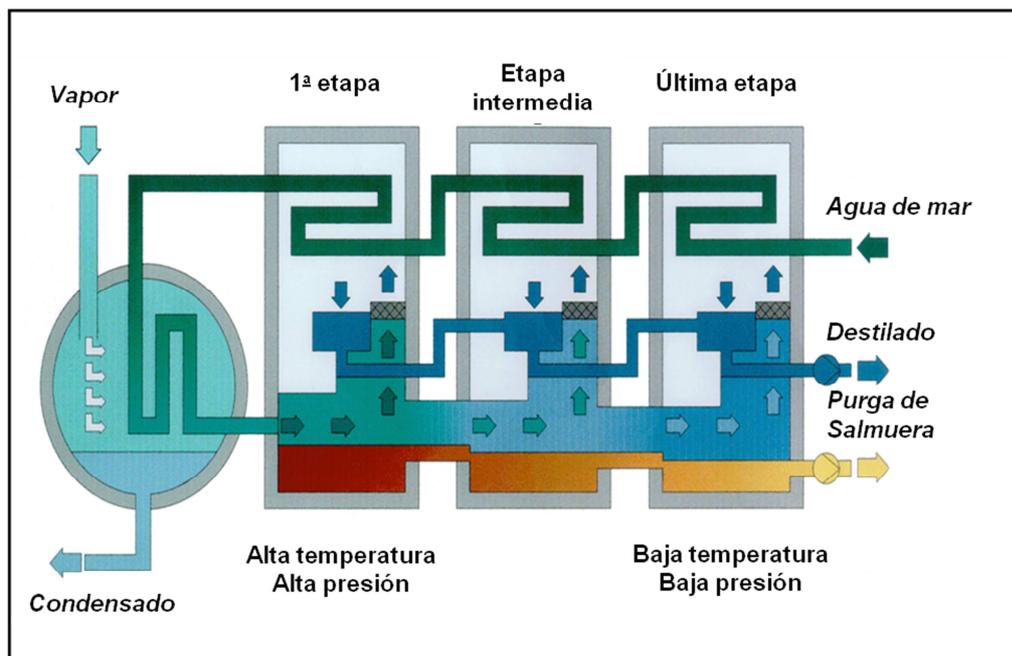


Figura 4-1: Principio de operación de unidad MSF (Modo de una sola pasada)

4.1.3 Descripción del proceso MED

Como en el proceso MSF, en el proceso de destilación multi-efecto MED el agua salada es destilada por medio de evaporación y posterior condensación. El calor para este proceso

¹¹ La salmuera es una solución de sal en agua. En este contexto se refiere al agua residual, que queda después de extraer el agua de producto. El calentador de salmuera es el intercambiador de calor final para elevar el agua a su máxima temperatura para ser procesada.

térmico proviene típicamente de vapor generado externamente. El proceso MED funciona según el principio ilustrado en la Figura 4-2.

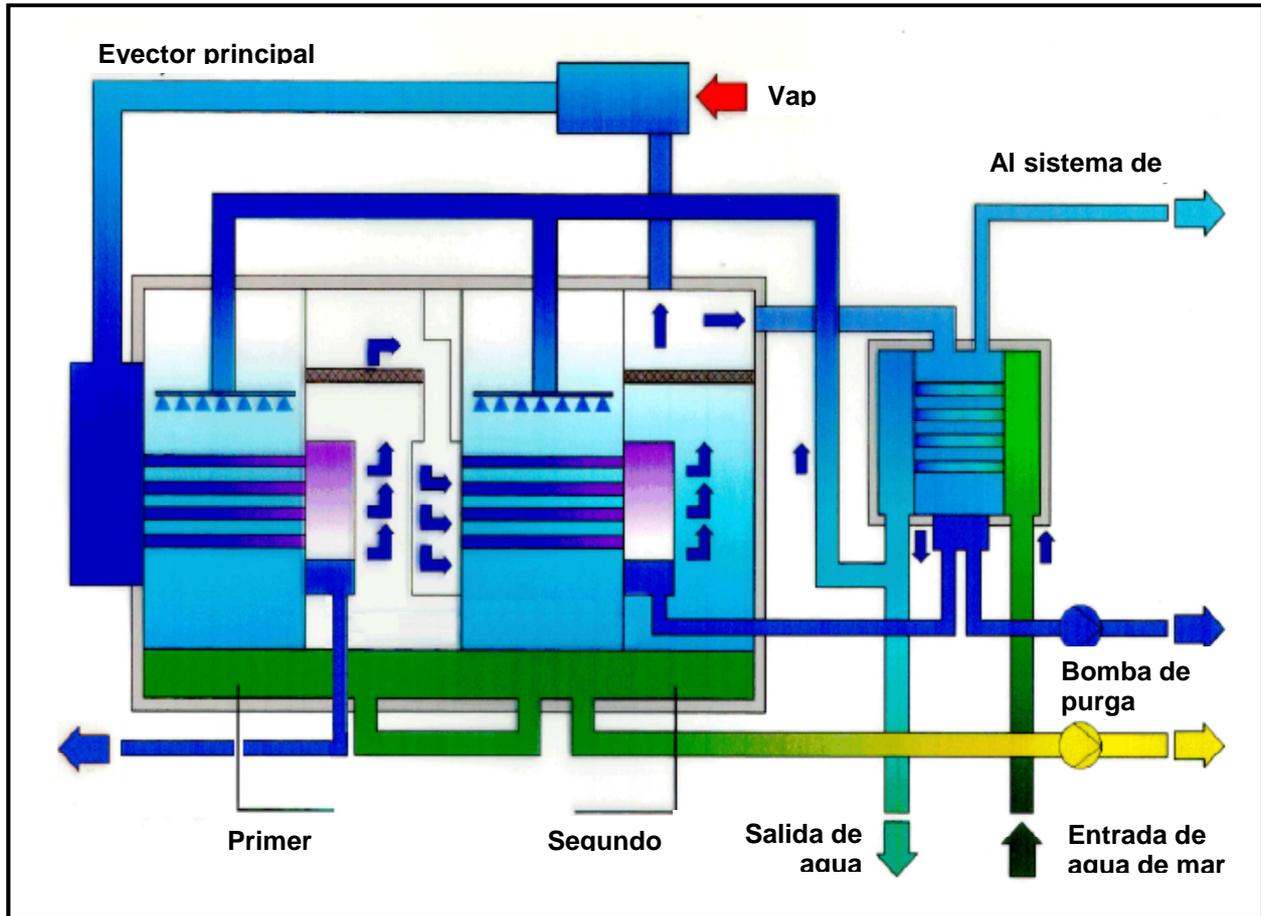


Figura 4-2: Principio de operación de una unidad MED-TVC

Básicamente el vapor producido del agua de mar en un efecto es usado (ya) en el efecto siguiente para la evaporación del agua de mar. Este procedimiento se repite de efecto a efecto con temperatura y presión progresivamente decrecientes, debido a diferencias de temperatura requeridas para la transmisión de calor, así como por otras imperfecciones del proceso y del equipo¹².

En el proceso MED se emplean haces de tubos horizontales para el intercambio de calor: agua salada es rociada sobre la parte superior del haz, humedeciendo la cara exterior de los tubos del intercambiador de calor, y absorbiendo el calor del vapor condensando al interior de los tubos y evaporándose. Después el vapor pasa por un dispositivo antivaho ("demister") y provee el calor de evaporación para el próximo efecto.

El proceso es impulsado por una fuente externa de calor, que se agrega al primer y más caliente efecto. Básicamente sirve cualquier fuente de calor que proporcione una cantidad suficiente de calor a (típicamente) 65°C o mayor.

¹² Por ejemplo elevación del punto de ebullición debido a la salinidad, pérdidas por caída de presión, pérdidas de aislamiento.

El vapor producido en el último efecto es conducido a un condensador final¹³, donde se usa agua de mar como medio enfriador. Dependiendo del nivel de temperatura del agua de mar una parte o toda el agua de mar (pre) calentada es alimentada a la unidad MED, mientras el agua restante es descargada al mar.

Además del calor, el proceso MED requiere también de energía eléctrica. El consumo de esta fuente de energía es de aproximadamente 1,5 a 2,5 kWh por m³ de destilado. La energía eléctrica es utilizada principalmente para elevar el agua de mar y distribuirla mediante rociado a lo largo de los haces de tubos del intercambiador de calor.

4.1.3.1 MED “simple” y MED-TVC

Dos versiones establecidas del proceso MED son relevantes aquí¹⁴: tMED “simple”¹⁵ para bajas presiones de vapor (típicamente menos de 0,5 bar) y MED con compresión térmica de vapor (**MED-TVC**) usando vapor a un mínimo de aprox. 2,5 a 3 bar.

Para comparar ambas versiones se muestran sus diagramas de proceso en la Figura 4-3 y Figura 4-4, respectivamente.

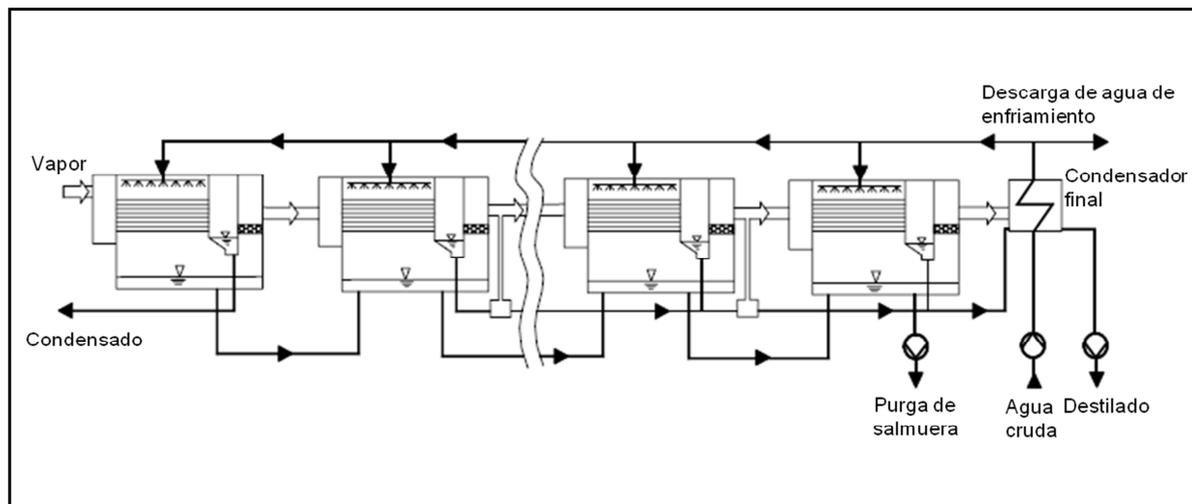


Figura 4-3: Diagrama de proceso de un MED “simple” MED [Glade 2003]

En un proceso “simple” MED el vapor es alimentado en el efecto más caliente, donde solamente se usa su calor (latente).

En el proceso MED-TVC el vapor pasa por un termo-compresor (extremo superior derecho en la Figura 4-4) antes de entregar su calor al efecto más caliente. En el termo-compresor el vapor actúa como un vapor motriz que succiona vapor de baja presión desde el efecto aguas abajo. Posteriormente ambos flujos (vapor motriz y vapor succionado) se mezclan y son finalmente

¹³ en muchos casos el condensador final es integrado al último efecto.

¹⁴ Una tercera versión, MED con compresión mecánica de vapor (MED-MVC) se considera irrelevante para este estudio.

¹⁵ De acuerdo con la nomenclatura usada entre expertos, este estudio utilizará el término MED como término genérico (para todos los procesos MED), y llamará “simple” al proceso MED sin compresión de vapor. En consecuencia el respectivo significado del término “MED” debe ser deducido del contexto.

descargados al primer efecto a un nivel de temperatura que es suficiente aún para una adecuada transferencia de calor.

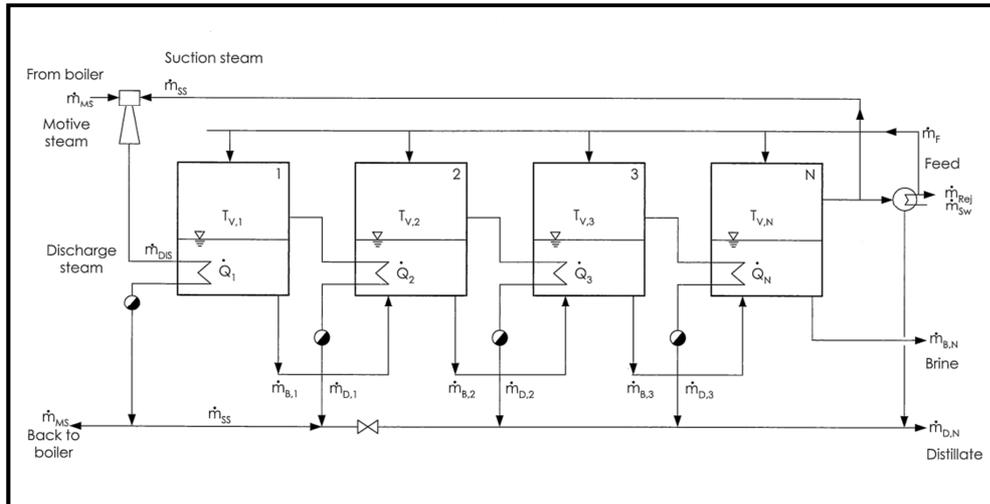


Figura 4-4: Diagrama de proceso de un MED-TVC [Gebel 2008]

La integración de una termo-compresión en un proceso MED reduce básicamente el número de efectos, en comparación con un MED “simple”. Además la posibilidad de adaptar el diseño MED a un rango más amplio de presiones de vapor agrega valiosa flexibilidad en cuanto a la generación de vapor.

Sin embargo, en combinación con plantas solar térmicas la MED “simple” parece ventajosa en varios aspectos.

Las razones principales son:

- Presión del vapor extraído: la posibilidad de trabajar con presiones de vapor más bajas en MED a 0,35 bar, en comparación con 2,5 a 3 bar en el caso de MED-TVC, significa que un rango más amplio de presiones puede ser utilizado para generación eléctrica.
- Flexibilidad operacional de la planta: La planta MED “simple” puede ser operada entre 100 – 0%, mientras que la unidad MED se mantiene bajo vacío y circulación fría. La unidad MED se comporta como cualquier condensador simple de una central termoeléctrica y produce agua sólo cuando hay vapor disponible. Esta condición se acomoda mejor a las restricciones de plantas solar térmicas, como por ejemplo la operación durante horas de radiación solar y la paralización completa durante la noche, mientras que la operación de MED-TVC sólo puede ser reducida a 60%.

4.1.3.2 Límites de temperatura

Los parámetros de diseño más importantes impuestos a una planta desalinizadora térmica son la temperatura mínima y máxima de proceso. La temperatura mínima de proceso está determinada básicamente por la temperatura máxima del medio de enfriamiento, que es la temperatura máxima del agua de mar¹⁶. La temperatura máxima de proceso está determinada por la capacidad del proceso de manejar la precipitación de sales:

¹⁶ La temperatura mínima del agua de mar (en época de invierno) es de importancia secundaria, pero debe ser considerada también. En el proceso MED el perfil de temperatura dentro de la unidad MED es mantenido constante a bajas temperaturas del agua de mar, porque la estrecha interrelación que

- En un proceso MSF una velocidad de flujo relativamente alta, un sistema de operación continua de limpieza con esfera de esponja al interior de los tubos del intercambiador de calor y el uso de efectivos aditivos anti-incrustación permiten elevar la temperatura máxima de la salmuera (TBT) a valores alrededor de 115°C.
- En un proceso MED, la superficie susceptible de sufrir incrustación es humedecida por gotas de agua de mar que caen. En consecuencia los medios para controlar incrustación son bastante limitados y la temperatura máxima de la salmuera sólo llega a alrededor de 68 °C. Aquí debe señalarse, que el enfoque MED-TVC permite desacoplar el nivel de temperatura del vapor de calentamiento de la temperatura máxima de la salmuera – a diferencia del MSF, donde la temperatura máxima de la salmuera es la única determinante clave del nivel de temperatura del sistema de calentamiento.

4.1.3.3 Coeficiente de rendimiento

Una vez identificados los límites de temperatura, la próxima característica significativa de diseño de una planta desalinizadora térmica es el requerimiento de calor. Aquí se ha establecido el coeficiente de rendimiento (“performance ratio” PR) para medir la eficiencia térmica de un proceso MED o MSF. Este coeficiente se define como la cantidad de destilado en *kg* que se produce por cada 2326 kJ^{17} de calor suministrado de fuera del proceso.

Los determinantes de diseño clave para el PR son:

- tipo de proceso (por ejemplo MSF, MED, MED-TVC)
- número de etapas flash / efectos
- intercambiadores de calor adicionales para precalentar el agua de mar alimentada a la planta con ayuda de un destilado más caliente y / o de la descarga de salmuera.

Además de los detalles específicos de diseño, los detalles específicos de operación también influyen en el PR. Los más relevantes de estos impactos operacionales son:

- temperatura del agua de mar,
- ensuciamiento e incrustaciones en las superficies de intercambiadores de calor y
- fugas.

Teóricamente una planta de desalinización térmica puede ser diseñada para ofrecer un amplio rango de PR. En la práctica, la necesidad de balancear CAPEX versus OPEX (donde los costos de energía juegan un rol mayor) resulta en la mayoría de los casos en un PR de alrededor de 8 a 10 $\text{kg}/2326 \text{ kJ}$.

gobierna las características de la transferencia de calor apenas deja alguna flexibilidad en cuanto al perfil de temperatura. Así en el proceso MED la mayor demanda de calor en invierno es compensada por medio de transferir calor desde la salmuera y/o el destilado en intercambiadores de calor externos. En cuanto a los procesos MSF, en invierno el perfil de temperatura se mueve a un nivel que es algunos grados más bajo que en verano.

¹⁷ Este valor se remonta a la referencia calórica original, que fue de 1000 Btu/lb (British Thermal Unit/Pound)

4.1.3.4 La razón de ganancia salida (“gain output ratio GOR”)

Otra cifra de performance utilizada frecuentemente para plantas de desalación térmica es la razón de ganancia salida (“gain output ratio GOR”). La GOR está definida como la razón del flujo másico del destilado al flujo másico de vapor suministrado al proceso. Debe tenerse cuidado de no confundir el PR con la GOR.

4.1.3.5 Diseño de la unidad

El aspecto final de diseño a ser considerado aquí es la construcción de una unidad MED o MSF: normalmente las unidades de desalinización térmica están construidas como una entidad. Es aparente, que la unidad está construida como un bloque, con el diseño interior (en particular el número de etapas y las áreas de intercambio de calor implementadas en cada etapa) ya completado. En consecuencia, es poco práctico cambiar el diseño de una unidad de desalinización térmica una vez que ésta fue construida.

4.2 Valor del calor: Enfoque eléctrico equivalente

La formación de los precios del vapor no es tan pronunciada como la de otros insumos (por ejemplo electricidad o agua potable): el precio del calor depende de demasiados factores, siendo los más significativos los siguientes

- la cercanía a la instalación de generación de vapor a fuente de calor
- el nivel de presión o temperatura (entropía)
- el tipo de instalación de generación de vapor (por ejemplo central eléctrica, colector solar térmico, etc.)
- el tipo de energía primaria (por ejemplo gas, carbón, radiación solar, etc.)
- la eficiencia económica del uso opcional.

En consecuencia, el precio del calor debe ser determinado para cada aplicación sobre una base individual. Como resultado, podrían determinarse precios muy altos de calor en caso que el calor sea generado por medio de colectores solar térmicos, mientras los costos podrían ser muy bajos en caso de energía de baja temperatura (resultante por ejemplo de un proceso químico exotérmico), que no pueda ser usada en el sitio¹⁸ excepto para impulsar un proceso de desalinización térmica.

En este contexto, el enfoque de electricidad equivalente es una herramienta apropiada para un número significativo de plantas de desalinización térmica: aquellas alimentadas con vapor extraído de una turbina a vapor de una central termoeléctrica. Dado que en una configuración de cogeneración el vapor es extraído de la turbina a vapor a una presión mayor que la presión del condensador, la generación de electricidad se reduce en una cierta cantidad. En otras palabras: si la cantidad de vapor extraída hubiese sido expandida en la turbina a vapor (bajando hasta la presión de condensación), podría haberse generado alguna cantidad adicional de electricidad. Esta cantidad adicional de electricidad se denomina “electricidad equivalente”.

¹⁸ Este es el único caso en el que sería aceptable, desde un punto de vista de ciencia popular, hablar de “calor residual o calor de descarte”.

En cuanto a los costos de la electricidad equivalente, es evidente una dependencia básica: los costos aumentan con el aumento de la presión del vapor extraído. Pero también debe ser considerado, que los costos atribuibles al vapor pueden variar, aún para presiones idénticas de vapor. Por ejemplo, el costo de la electricidad equivalente de vapor extraído a 1 bar asciende a 1,5 US\$/t_{vapor}, si la temperatura de condensación es tan alta como 65 °C, mientras que el costo atribuible al vapor con la misma presión puede aumentar a 9,5 US\$/t_{vapor} si la temperatura de condensación es de 36 °C.

4.3 Procesos MSF y MED: Conclusiones

Las consideraciones de diseño de MSF y MED pueden ser resumidas como sigue:

- ambos procesos usan evaporación y condensación a temperaturas progresivamente decrecientes y vapor a presión para desalinizar agua de mar.
- ambos procesos requieren de un diseño hecho a la medida, con el fin de ajustarse a su perfil de temperatura dentro de los límites de temperatura fijados por restricciones de proceso (incrustaciones) así como por restricciones debidas a condiciones ambientales (temperatura máxima del agua de mar). Hoy en día los incrementos de temperatura en ambos procesos son de aproximadamente 3 a 4 K por cada etapa/efecto.
- una buena eficiencia de una planta MED no se traduce inherentemente también en un buen coeficiente energético (buen coeficiente de rendimiento).
- unidades MED y también unidades MSF son construidas como una entidad. En consecuencia, modificaciones posteriores son imprácticas.

Tabla 4-1: Tabla comparativa de características clave de MED y MSF

	MED	MSF
Eficiencia térmica	10 kg de destilado / 2326 kJ	10 kg de destilado / 2326 kJ
Flexibilidad operacional	0 % -100 % de la capacidad de diseño	60 % - 100 % de la capacidad de diseño
Electricidad requerida	Baja, comparada con MSF	Alta, dos veces la cantidad de MED

Dado que la tecnología MSF no ofrece ventajas comparada con MED y, por el contrario, requiere significativamente más electricidad y elevados costos de inversión, MED es favorecida frente a MSF, dejando fuera de consideración a MSF en este estudio a partir de este punto.

Además, MED será considerada en su configuración “simple”, sin TVC. Esto es ventajoso, especialmente en el contexto con plantas solar térmicas, debido a su flexibilidad operacional y menor presión del vapor extraído (0,35 bar).

4.4 Comparación de datos clave técnicos y financieros de tecnologías de desalinización

A continuación se resumen brevemente en tablas los datos clave más esenciales para las tecnologías comerciales de desalinización, comprendiendo tecnologías térmicas (MSF y MED) y de membrana (SWRO):

4.4.1 Datos clave de diseño

Los datos clave de diseño de las diferentes tecnologías de desalinización incluyendo térmicas (MSF y MED) y de membrana (SWRO) están listadas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Datos clave de diseño¹⁹

Parámetro	Unidad	MSF	MED	SWRO
Sólidos disueltos máximos en el concentrado	%	~ 6,9	~ 5,8 - 6,4	~ 7,0
Recuperación máxima de agua de mar ^(a)	%	~ 40	~ 30	~ 45
Recuperación total de agua de mar	%	~ 11 - 14	~ 11 - 14	~ 45
Agua típica de producto (sólidos disueltos totales)	mg/l	< 25	< 25	~ 250 - 500 ^(b) ~ 20 - 100 ^(c) < 5 ^(d)
Requerimiento específico de área	m ² / (m ³ /d)	0,13 – 0,25	0,13 – 0,25	0,4 – 0,6

- a) Sin agua de enfriamiento
- b) Calidad del permeado del primer paso
- c) Calidad del permeado del segundo paso
- d) Calidad del permeado de un posible tercer paso

¹⁹ Fuente: Base de datos de Fichtner

4.4.2 Datos clave de energía

La demanda de energía es un factor decisivo para cada tecnología de desalinización. Los datos clave de diseño indicados más arriba representan cifras actuales típicas en lo concerniente a las tecnologías de desalinización establecidas. Estas pueden ser evaluadas como sigue:

Tabla 4-3: Datos clave de energía²⁰

Parámetro	Unidad	MSF	MED	SWRO
Temperatura máxima del concentrado	°C	< 115...120	< 70	< 45
Presión típica del vapor	bar	~ 2.5...3.0	~ 2.5 ...3.0 ^(a) ~ 0.3 ...0.5 ^(b)	-
Demanda típica actual de calor	MJ/m ³	~ 233...258 ^(c)	~ 233...258 ^(c)	-
Demanda típica actual de electricidad	kWh/m ³	~ 3.0...5,0	1.5 – 2.5	~ 3.0...5,0

(a) MED-TVC

(b) MED "simple"

(c) Correspondiente a un coeficiente de rendimiento de 9 a 10 kg/2326 kJ

4.4.3 Datos clave de costos

Además de los datos técnicos clave discutidos en las secciones anteriores, también deben ser evaluadas las principales cifras de costos, a saber los desembolsos de capital y los desembolsos de operación (las dos secciones siguientes).

En la Tabla 4-4 se muestran rangos específicos de CAPEX, observados desde fines de los años 1990.

En los años 2006 a 2008 los CAPEX específicos de todas las tecnologías de desalinización establecidas subieron, en comparación con el período anterior (1998 a 2005). La razón principal de este notorio aumento de CAPEX fue la demanda rápidamente creciente de nueva capacidad de desalinización, así como la demanda de materias primas (por ejemplo aleaciones de acero inoxidable)²¹, en general. Sin embargo, como secuela de la crisis financiera de 2008/2009 se observó una disminución substancial de CAPEX específico, indicando que el mercado se está convirtiendo más y más en un mercado de compradores. En consecuencia es razonable suponer, que los valores más bajos observados en el segundo período son buenas estimaciones para el actual CAPEX específico (2010) bajo circunstancias "normales".

Dicho esto, el actual CAPEX específico (basado en la propia base de datos de Fichtner y en información de desalinización de Global Water Intelligence - GWI)²² puede esperarse como muy similar para ambas tecnologías convencionales de desalinización térmica (alrededor de

²⁰ Fuente: base de datos de Fichtner

²¹ Los costos son muy sensibles a las fluctuaciones de precios de las mercaderías ("commodities") y a la competencia por otros recursos, como son los fabricantes capaces y personal experimentado. Estos efectos serán discutidos en mayor detalle en el Capítulo 6.

²² Referencia: <http://desaldata.com/>

US\$ 1.700 por m³/d de capacidad instalada). Comparado con esto, la cifra correspondiente para plantas SWRO es aproximadamente 25% más baja.

Tabla 4-4: CAPEX específico para la planta completa, incluyendo todas las instalaciones, edificios y sistemas, en US\$ / (m³/d)²³

Parámetro	Unidad	MSF	MED	SWRO
CAPEX específico	US\$/m ³ /d	1700 - 2900	1700 – 2700	1300 - 2500 ²⁴

Debe destacarse que estos datos²⁵ son las cifras más apropiadas, pero aun así estimaciones. Además, al interpretar los datos presentados en la Tabla 4-4 se debe considerar lo siguiente:

- Los datos de costos no distinguen si una planta / proyecto fue contratada sobre base EPC (Engineering, Purchase and Construction) o BOOT (Build, Own, Operate, Transfer). Diferentes enfoques probablemente afecten los costos de la planta, debido a condiciones comerciales diferentes, especialmente en relación con los límites de responsabilidad.
- Los datos de costos no distinguen entre diferentes condiciones de sitios, por ejemplo calidad del agua de mar o topografía del sitio.
- Los datos de costos no distinguen entre diferentes regiones. Por ejemplo, el CAPEX específico es relativamente alto en regiones como Australia y los Estados Unidos, principalmente por materias reglamentarias y requerimientos ambientales.
- Los costos no distinguen entre capacidades de plantas, las que pueden jugar un rol importante en términos de economías de escala.

Por último, debe ser tomado en cuenta que las ofertas proponiendo la misma tecnología de desalinización para el mismo proyecto pueden variar substancialmente en términos de las sumas contractuales propuestas²⁶.

4.4.3.1 Desembolsos operacionales (OPEX)

Así como el CAPEX específico, el OPEX también puede variar substancialmente, dependiendo de las características específicas del proyecto. Por esto los OPEX de las diversas tecnologías de desalinización son discutidas en base a un conjunto de datos más generales (ver Figura 4-5).

²³ Fuente: Base de datos de Fichtner y estimador de costos GWI Desal Data

²⁴ El límite superior sería aplicable a plantas pequeñas, que deben lidiar con condiciones adversas de agua de mar (alto contenido de materia orgánica) y que requieren de tuberías de captación y descarga muy largas, difíciles obras de interconexión y requerimientos estrictos de cumplimiento con reglamentos ambientales.

²⁵ Considerando plantas de desalinización convencionales construidas en todo el mundo. Más estimaciones de costos relativas al estudio se entregan más adelante en el informe de desalinización con CSP (Capítulo 6).

²⁶ Diferencias de 50% o más entre la oferta más baja y la más alta no son inusuales.

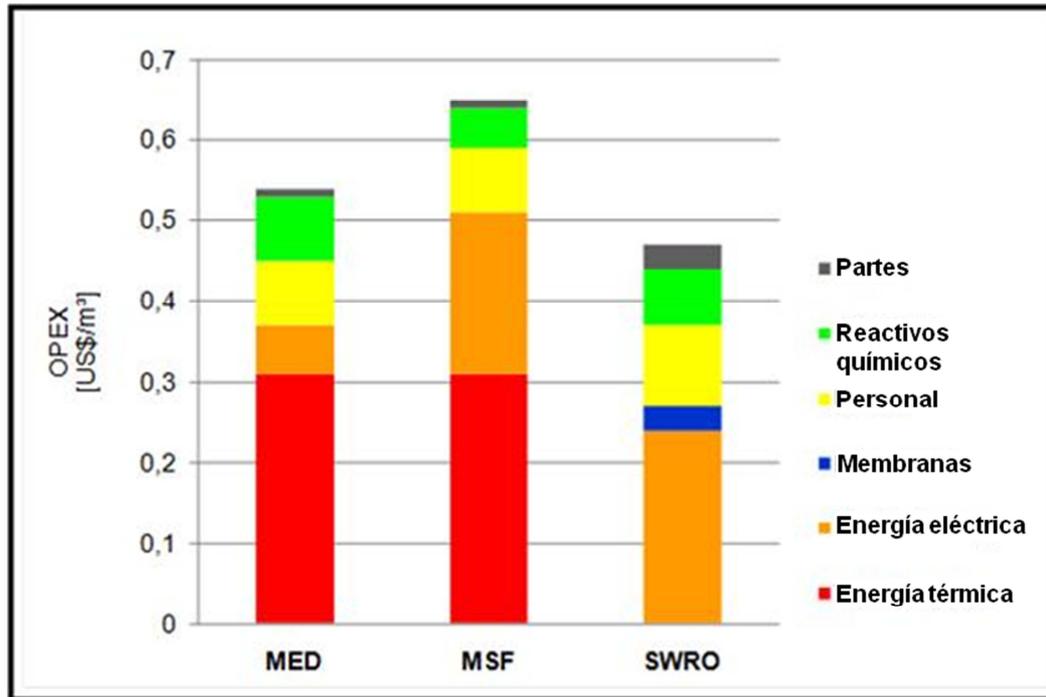


Figura 4-5: OPEX para tecnologías convencionales de desalinización (basado en datos de [GWI 2010a] ²⁷)

Siguiendo este enfoque se pueden extraer las siguientes conclusiones generales:

- La tecnología SWRO presenta los OPEX más económicos (0,47 US\$/m³). La diferencia respecto a MED (0,54 US\$/m³) es significativa, pero no inmensa. En consecuencia es bastante realista suponer que la tecnología MED es competitiva con la tecnología SWRO bajo circunstancias especiales, por ejemplo, cuando se requiere alta pureza y cuando hay disponibilidad de energía térmica a bajo costo. Comparativamente el OPEX substancialmente mayor de la tecnología MSF (0,65 US\$/m³), puede ser considerado como prohibitivo.
- Ambas tecnologías de desalinización térmica están sujetas a los costos de la energía térmica (0,31 US\$/m³, producida mediante ciclos de agua-vapor o en centrales termoeléctricas convencionales), que representa aproximadamente la mitad del OPEX total. Mientras este cargo es más o menos compensado por una demanda muy baja de energía térmica en el caso de la tecnología MED, es el causante que la tecnología MSF sea la más onerosa en térmicos de OPEX²⁸.
- Las cifras de los demás ítem de OPEX reflejan la diferencia entre las distintas tecnologías de desalinización en varios aspectos (por ejemplo, costos de personal comparativamente altos debido al requerimiento de contar con personal especializado para la operación de una planta SWRO o costos de reactivos químicos comparativamente bajos en la tecnología MSF). Sin embargo, estas diferencias son relativamente pequeñas y por lo tanto no afectan el cuadro general, definido por la demanda de energía térmica y de energía eléctrica.

²⁷ El gráfico muestra costos químicos bastante similares para SWRO y MED, mientras que el consumo de reactivos químicos de MED se espera sean menores en general que para SWRO.

²⁸ Considerando un GOR de 9-10.

4.4.4 Conclusiones

Con miras a una evaluación económica entre las tecnologías de desalinización de osmosis inversa y solar térmica, se resumen a continuación las conclusiones de las consideraciones de diseño y costos, como resultado de análisis de factibilidad técnica y de rentabilidad:

- Las tres tecnologías de desalinización MST, MED y SWRO están maduras y proveen la capacidad para grandes producciones de agua.
- Ambos procesos térmicos, MSF y MED, usan evaporación y condensación a temperaturas y presiones progresivamente decrecientes para desalinizar agua de mar. Hoy en día las plantas MED-TVC o MSF con una razonable eficiencia energética producen alrededor de 10 kg (destilado) por 2326 kJ de calor. Normalmente el calor es suministrado por vapor producido externamente en plantas de cogeneración o centrales termoeléctricas.
- SWRO es, sin embargo, muy factible como planta autónoma para la producción de agua. Dada la disponibilidad de una red eléctrica, no necesariamente deben estar ubicadas cerca de la central solar térmica.
- Ambos procesos térmicos requieren diseños hechos a la medida con el fin de acomodar su perfil de temperatura dentro de los límites determinados por restricciones del proceso (incrustaciones) y por restricciones debidas a condiciones ambientales (temperatura máxima del agua de mar). Hoy en día los incrementos de temperatura son de alrededor de 2 a 4 K por efecto / etapa.
- Ambas tecnologías, MSF y MED, pueden ser consideradas similares desde el punto de vista de aspectos técnico. Tanto MSF como MED son construidas como una sola entidad. En consecuencia, modificaciones posteriores son imprácticas.
- Una buena eficiencia económica de una planta MED no necesariamente conlleva a una buena eficiencia energética (buen coeficiente de rendimiento).
- Contrariamente a las demandas de calor de las tecnologías establecidas de desalinización térmica, hay diferencias substanciales en la demanda de energía eléctrica entre las tecnologías MED y MSF. Debido a la sola longitud de las tuberías por donde debe circular el concentrado, la tecnología MSF requiere aproximadamente el doble de electricidad que la tecnología MED. Vice versa, la baja demanda de electricidad de la tecnología MED en comparación con la tecnología MSF es su mayor ventaja competitiva. Así MED parece más ventajosa en combinación con centrales eléctricas (solar / convencional).
- MED es considerada además en su configuración “simple”, sin TVC. Esto es ventajoso especialmente en el contexto con plantas solar térmicas, debido a su flexibilidad operacional (0 – 100%) y la baja presión del vapor extraído (0,35 bar).

4.5 Alternativas de Tecnología Solar

4.5.1 Tecnología de colectores solares

En forma general, los colectores solar térmicos pueden ser divididos en sistemas concentradores y no-concentradores.

El calor solar de baja temperatura (bajo 100°C) puede ser generado mejor en colectores no-concentradores o de baja concentración. Esto permite usar campos solares relativamente simples, sin partes móviles, lo que implica menores costos de inversión y de operación.

Los campos solares generando altas temperaturas sufren de mucho más pérdidas de calor que los sistemas de baja temperatura. Mientras que las tuberías transportando el fluido de transferencia de calor (HTF) pueden ser aisladas eficientemente, el aislamiento térmico es mucho más difícil en el colector mismo. Aquí deben ser minimizadas las pérdidas térmicas, mientras que simultáneamente debe absorberse la mayor cantidad posible de irradiación solar.

Además del aislamiento térmico, la sola reducción de superficies calientes ayuda a minimizar las pérdidas térmicas. Para reducir las áreas de superficies calientes en los campos solares, los sistemas de alta temperatura usan espejos para concentrar la irradiación solar desde grandes superficies (área de apertura) a una superficie relativamente pequeña del receptor. Mientras mayor sea la razón de concentración, mayor es la temperatura posible de lograr.

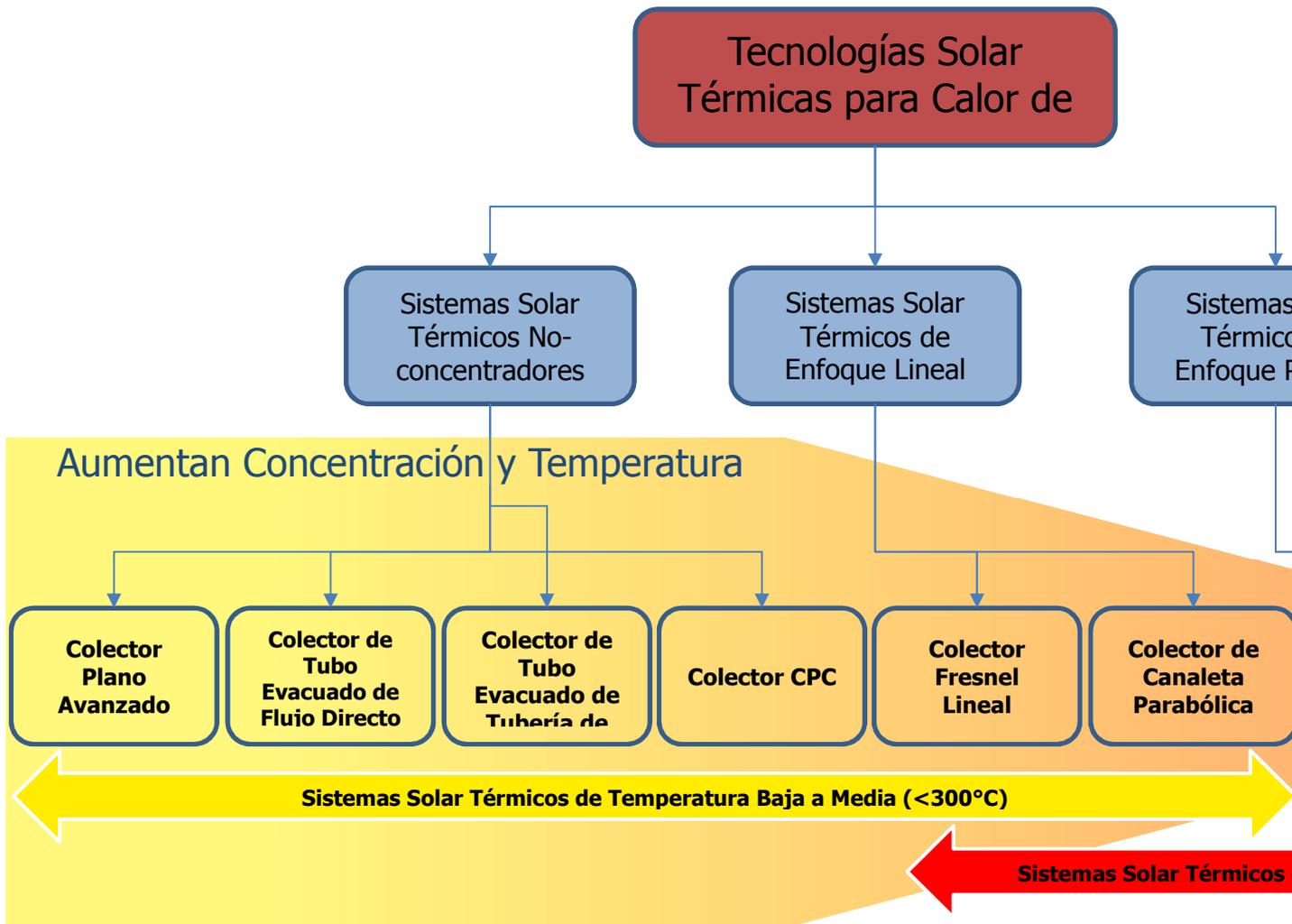


Figura 4-6: Tecnologías solares para calor de proceso

Como se dijo en el **Capítulo 4.1** las necesidades de calor de una planta de desalinización apropiada son del orden de sólo 70°C. Cuando se desea implementar almacenamiento térmico, la temperatura de salida del campo solar debería ser ligeramente superior a 100 °C para permitir un eficiente intercambio de calor.

Los colectores cubriendo estas temperaturas incluyen colectores de tubos evacuados, así como tecnologías de enfoque lineal como colectores Fresnel y colectores parabólicos. Colectores no-concentradores sin aislamiento suficiente no logran producir eficientemente temperaturas alrededor de los 100 °C. Tecnologías de enfoque puntual, por otra parte, son más complejas y demasiado costosas para generar las temperaturas mencionadas.

Colectores de tubos evacuados

En el grupo de los colectores no-concentradores o de baja concentración, el diseño con tubos evacuados es el que mejor se presta para temperaturas sobre 100 °C. El vacío alrededor de la superficie absorbente evita de forma muy eficiente pérdidas de calor por convección desde los tubos de absorción. Esta tecnología también está disponible con el llamado colector parabólico compuesto (compound parabolic concentrator CPC). Este tipo de concentrador es un reflector de forma parabólica, sin seguimiento, puesto detrás de un grupo de tubos evacuados. Además del campo solar relativamente simple, otra ventaja de los colectores no-concentradores o de baja concentración es que también pueden usar la radiación difusa para generar calor.

- No hay partes móviles en el campo solar
- Es posible el uso de la radiación difusa
- Rango de temperaturas hasta 180 °C



Figura 4-7: Concentrador parabólico compuesto (CPC)²⁹

Colectores lineales Fresnel

En colectores lineales Fresnel una multitud de espejos faceta siguen al sol para reflejar la luz del sol sobre un receptor montado sobre el plano de los espejos.

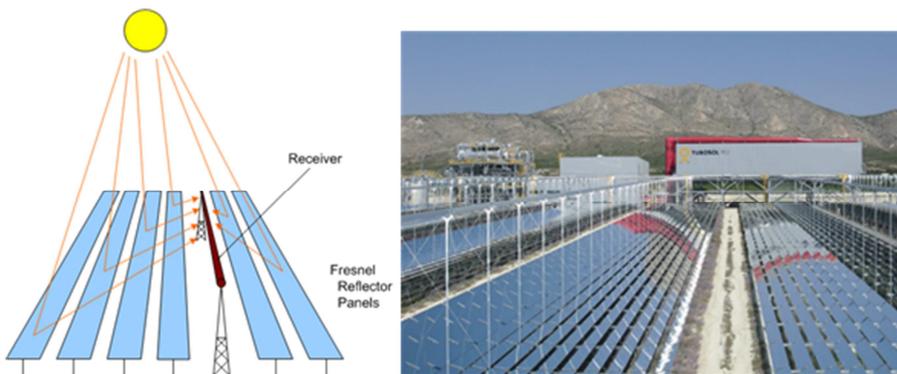


Figura 4-8: Colectores Fresnel³⁰ lineales

²⁹ Fuente: Izquierda: www.rayotec.com Derecha: <http://airsquared.com/industries/energy>

³⁰ Fuente: Izquierda: Fichtner Derecha: Novatec

Las ventajas de los colectores Fresnel lineales incluyen, que el receptor está montado en posición fija, de manera que no se necesitan uniones rotatorias de tuberías para transportar el HTF a través del campo solar. Además, la tecnología Fresnel es conocida por su buen uso del terreno, es decir que gran parte del terreno puede ser cubierta con un área de apertura activa. Mientras que los colectores Fresnel pequeños están diseñados para temperaturas más bajas, entre 100°C y 200°C, los colectores Fresnel pueden producir hasta 500 °C con diferentes medios de HTF.

- Buen uso del terreno
- Receptor fijo
- Complejidad media del campo solar
- Temperaturas hasta 500°C, a pequeña escala 100°C - 200°C.

Colectores de canaleta parabólica

En los colectores de canaleta parabólica (parabolic troughs), espejos de forma parabólica enfocan la irradiación directa normal sobre un tubo receptor, montado en el punto focal de la parábola. Entre los sistemas de enfoque lineal, los colectores de canaleta parabólica ofrecen la mayor eficiencia óptica. La tecnología de canaleta parabólica es la opción técnicamente más madura entre las alternativas CST. Las centrales SEGS³¹ en California han estado operando exitosamente por más de 30 años.

- Alta eficiencia óptica
- Largo historial
- Complejidad comparativamente alta

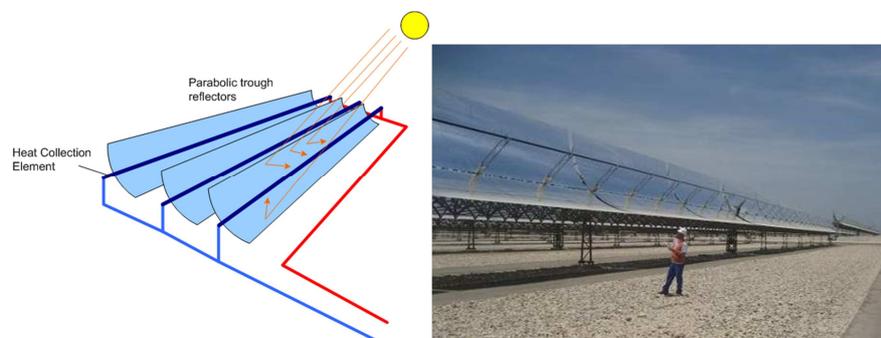


Figura 4-9: Canaletas parabólicas³²

³¹ SEGS: Solar Energy Generating Systems – Centrales solares con colectores de canaleta cerca de Kramer Junction, USA

³² Izquierda: Esquema de colectores de canaleta; Fuente: Fichtner

Derecha: Esquema de colectores de canaleta; Foto: Fichtner

Tabla 4-5: Tabla comparativa de tecnologías seleccionadas

	Diseño	Performance	Idoneidad General
Tubo evacuado	Sin partes móviles en el campo solar	Más baja eficiencia anual de campo. Sin embargo, posible uso de radiación difusa	Buena
Fresnel lineal	Partes móviles, pero receptor fijo	Eficiencia óptica media	Pequeña escala - buena
Canaleta parabólica	Diseño más complejo	Buena eficiencia óptica	Pequeña escala - media

4.5.2 Fluido de transferencia de calor

La elección del fluido de transferencia de calor (HTF) va de la mano con la elección del mejor método de integración de calor al proceso. Si el calor generado por el campo solar debe ser integrado directamente con ayuda de un intercambiador adicional de calor, el agua es la única opción como HTF. En caso que el concepto considere implementar un generador solar de vapor, el HTF del campo solar puede ser escogido más libremente. En este caso vienen a la mente también aceites sintéticos y sal fundida.

Agua / vapor

Agua / vapor es usada ampliamente como HTF en diferentes procesos industriales por varias razones. Más allá de la amplia disponibilidad y del bajo costos, las propiedades físicas, como la alta capacidad térmica, hacen del agua un buen medio de proceso.

- Disponibilidad
- Bajo costo
- Alta capacidad térmica
- No tóxico
- Baja corrosividad
- Rango de temperatura: 0°C - >550°C.

Aceite sintético

El aceite sintético está siendo usado como HTF por muchos años en centrales con colectores parabólicos. Normalmente se utiliza una mezcla eutéctica³³ de por ejemplo difenilo / óxido de difenilo (VP1 o Dow A). Sin la necesidad de altas presiones pueden alcanzarse temperaturas de hasta 395°C. Es necesario un sistema de tratamiento para retirar fluido descompuesto del inventario. Cuando se considera junto con la generación de agua potable, deben implementarse medidas especiales de salud/seguridad/medio ambiente respecto de la instalación y operación.

- Experiencia de largo plazo
- Costo comparativamente alto
- Capacidad térmica media (más baja que agua o sal fundida)
- Tóxico
- No corrosivo
- Rango de temperatura: 12°C - 395°C
- Requiere de sistema de tratamiento.

Sal fundida

En el negocio de las centrales solar térmicas se han hecho grandes esfuerzos en investigación y desarrollo de sal fundida como HTF en centrales eléctricas solares. La razón principal para ello es la limitación de la temperatura de salida del campo solar usando aceite sintético. En los procesos de generación eléctrica esto lleva a una limitación de eficiencia de la unidad generadora. Durante los últimos años ha sido demostrado su uso comercial en centrales como Gemasolar³⁴. Deben ser consideradas materias de salud/seguridad/medio ambiente, así como la alta temperatura de solidificación, que hace inevitable medidas de protección anti congelamiento.

- Costo comparativamente alto (menor que aceite sintético)
- Alta capacidad térmica (ligeramente inferior al agua)
- Potencialmente tóxico
- Alta corrosividad
- Rango de temperatura: 250°C - 550°C (mezcla eutéctica binaria).

³³ Del griego: eutēktos – fácilmente fundido. Describe una mezcla de sustancias (usada especialmente para aleaciones) que tiene el punto más bajo de solidificación de todas las posibles mezclas de las sustancias.

³⁴ Gemasolar: una central solar con sistema de almacenamiento térmico de energía con sal fundida, localizada en Fuentes de Andalucía en la provincial de Sevilla, España.

4.5.3 Almacenamiento térmico de energía

La opción de implementar almacenamiento de energía comercialmente probado a gran escala en la planta es una de las grandes ventajas de las plantas solar térmicas sobre otras plantas de energías renovables. Las tecnologías de almacenamiento térmico se dividen generalmente en almacenamiento de calor latente (cambio de fase) y almacenamiento de calor sensible (diferencia de temperatura). Mientras los sistemas de almacenamiento de calor latente todavía están en la fase de investigación y desarrollo, los sistemas de almacenamiento de calor sensible listados más abajo ya están disponibles. La selección de un concepto de almacenamiento va siempre de la mano con la selección del HTF y de los parámetros de proceso que deben ser alcanzados.

Almacenamiento directo de HTF sintético:

En este concepto el aceite sintético es almacenado directamente en dos estanques de almacenamiento de HTF. El sistema fue probado en la primera central SEGS entre 1985 y 1999. Un desafío clave, que hace que el sistema sea menos atractivo, es el alto costo del aceite sintético y la menor capacidad específica de calor en comparación con el agua o la sal fundida. El alto costo del medio de almacenamiento sólo puede ser compensado en parte por su integración más sencilla con el campo solar (no se necesita intercambiador de calor de almacenamiento, el concepto de bombeo puede ser integrado al campo solar).

Sistema de almacenamiento de sal fundida con dos estanques:

El sistema de almacenamiento de sal fundida con dos estanques es el sistema del estado del arte en centrales solar térmicas. La Figura 4-10 muestra un sistema comercial con dos estanques de sal fundida. Para cargarlo se extrae sal fundida fría del estanque de almacenamiento frío, se calienta ésta en el campo solar y se introduce al estanque de almacenamiento caliente. Para extraer energía acumulada, el sistema simplemente funciona al revés. Hay dos tipos de sistemas de almacenamiento con sal fundida: el sistema directo y el sistema indirecto.

En el sistema directo la sal fundida es usada como HTF y medio de almacenamiento térmico, lo que elimina la necesidad de intercambiadores de calor. El sistema directo fue aplicado con éxito en el proyecto con receptor central Solar Two y hay un sistema de almacenamiento directo con sal fundida de dos estanques con capacidad para 15 h en servicio en la central con receptor central Gemasolar de 20 MWe. Para centrales con canaletas parabólicas se aplica un sistema indirecto. Los dos estanque de almacenamiento de sal fundida están integrados en el sistema HTF vía intercambiadores de calor para transferir calor entre aceite y sal de nitrato. Comparado con el almacenamiento directo, este sistema es más complejo.



Figura 4-10: Almacenamiento de energía con sal fundida en dos estanques³⁵

Almacenamiento en un solo estanque / Almacenamiento termoclina:

Un solo estanque para almacenar el fluido frío y el caliente brinda una posibilidad para reducir aún más el costo, en comparación con un sistema de dos estanques. En un sistema de acumulación termoclina (estanque único) los fluidos caliente y frío están separados por la diferencia de densidad. La zona entre los fluidos frío y caliente se llama termoclina.

Un concepto de almacenamiento termoclina con sal fundida está siendo probado actualmente en un proyecto piloto de la compañía española SENER³⁶. El almacenamiento está integrado en un sistema acumulador de sal fundida de dos estanques, lo que permite un mayor número de ciclos de carga y descarga al día. En este proyecto piloto la sal de nitrato fría y caliente están separadas por una barrera flotante.

El mismo concepto también es posible con agua como fluido almacenador. Cuando el agua está bajo presión pueden alcanzarse temperaturas sobre 100 °C, que podría ser un buen ajuste de combinación con plantas desalinizadoras solar térmicas. Un sistema de almacenamiento de energía térmica según este principio se encuentra actualmente en construcción para una red de calefacción urbana en el Norte de Alemania³⁷.

Almacenamiento de vapor

Pueden usarse acumuladores de vapor para la integración con un campo solar con producción directa de vapor. Los acumuladores de vapor sólo pueden cubrir períodos cortos, por ejemplo para amortiguar las fluctuaciones de producción del campo solar. El concepto es almacenar vapor saturado del campo solar en estanques a presión.

La Tabla 4-6 resume y discute las ventajas y desventajas de las tecnologías descritas y muestra sus límites de temperatura.

³⁵ Almacenamiento con sal fundida en dos estanques en una planta comercial. Foto: Fichtner

³⁶ SENER es un grupo privado de ingeniería y tecnología fundado en 1956, especializado en ofrecer soluciones tecnológicas.

³⁷ Referencia: <https://www.stadtwerke-kiel.de/swk/de/unternehmen/aktuell/gasheizkraftwerk/gasheizkraftwerk.jsp>

Tabla 4-6: Límites, ventajas y desventajas de diferentes conceptos de almacenamiento

	Límite de aplicación (presión & temperatura)	Ventajas	Desventajas
Aceite térmico directo	<ul style="list-style-type: none"> • Temp. máxima. 395°C • Grandes capacidades sólo posibles a alto costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Integración directa en el ciclo del campo solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo por la gran cantidad de aceite térmico • <u>HSE</u>: grandes cantidades de fluido ambientalmente riesgoso, riesgo de incendio
Estanque único Agua a presión	<ul style="list-style-type: none"> • Temp. Máxima aprox. 150°C • Capacidad de 15-18 horas a plena carga factible para la configuración propuesta 	<ul style="list-style-type: none"> • Integración directa posible, agua a presión como HTF • Nivel de temperatura bien en línea con necesidades de MED • <u>HSE</u>: sin riesgos especiales porque usa agua 	
Sal fundida	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de temp. aprox. 250°C - 550°C • Capacidad de 15-18 horas a plena carga factible para la configuración propuesta 	<ul style="list-style-type: none"> • Comercialmente probado en aplicaciones a gran escala • <u>HSE</u>: riesgo limitado de incendio 	<ul style="list-style-type: none"> • Protección anticongelamiento necesaria para componentes críticos • <u>HSE</u>: desmantelamiento / disposición de sal fundida al término de vida útil
Acumuladores de vapor	<ul style="list-style-type: none"> • Temp. máx. limitada por la temperatura del campo solar (aprox. 550°C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Integración simple con campo solar de DSG³⁸ solar es posible • <u>HSE</u>: sin riesgos especiales porque usa agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo permite almacenamiento de corto plazo (aprox. 0.5 h) • Pérdida de eficiencia con acumulación en nivel bajo

³⁸ DSG: Generación directa de vapor

4.6 Quemadores de respaldo

El perfil inestable de generación debido a fluctuaciones del recurso solar frecuentemente hace necesario instalar quemadores de respaldo en plantas solar térmicas. Dependiendo de la flexibilidad del proceso aguas abajo y de la implementación de almacenamiento de energía, la participación del uso de energía fósil puede variar desde cerca de cero hasta más de 90%.

La integración de energía fósil puede ser directa o indirecta. Integración directa significa generación de vapor con combustible fósil en una caldera suplementaria separada. Integración indirecta implica el calentamiento del HTF, mediante el cual puede ser generado vapor en el campo solar.

La mejor manera de integrar quemadores de respaldo debe ser evaluada para cada configuración por separado. Normalmente un generador de vapor es más beneficioso para conceptos con alta participación fósil. Sin embargo, los quemadores de respaldo también pueden ser utilizados para otros propósitos que la generación de vapor, por ejemplo en protección contra congelamiento en sistemas de sal fundida. En tal caso debe usarse un calentador del fluido de transferencia de calor.

5 Selección de la Tecnología

En el alcance de este estudio las más importantes condiciones de borde para la selección de subsistemas y su integración en una planta desalinizadora solar térmica son los parámetros requeridos por el proceso MED. Como se ha descrito en el Capítulo 4.1, los parámetros de vapor que requiere el MED son de alrededor de 70°C a 0,35 bar. Comparado con plantas solares para generación eléctrica, los requerimientos de presión y temperatura son mucho más bajos. Esto hace necesario considerar no sólo tecnologías usadas para la generación de electricidad, sino también sistemas que tienen su origen en calefacción doméstica o aplicaciones similares.

La Figura 5-1 muestra una visión general de los principales subsistemas disponibles en las categorías de tecnologías de colectores solares, integración de calor solar a un proceso, conceptos de almacenamiento y conceptos de hibridación. Combinando subsistemas adecuados, han sido identificados cinco conceptos. Éstos son descritos en el capítulo siguiente.

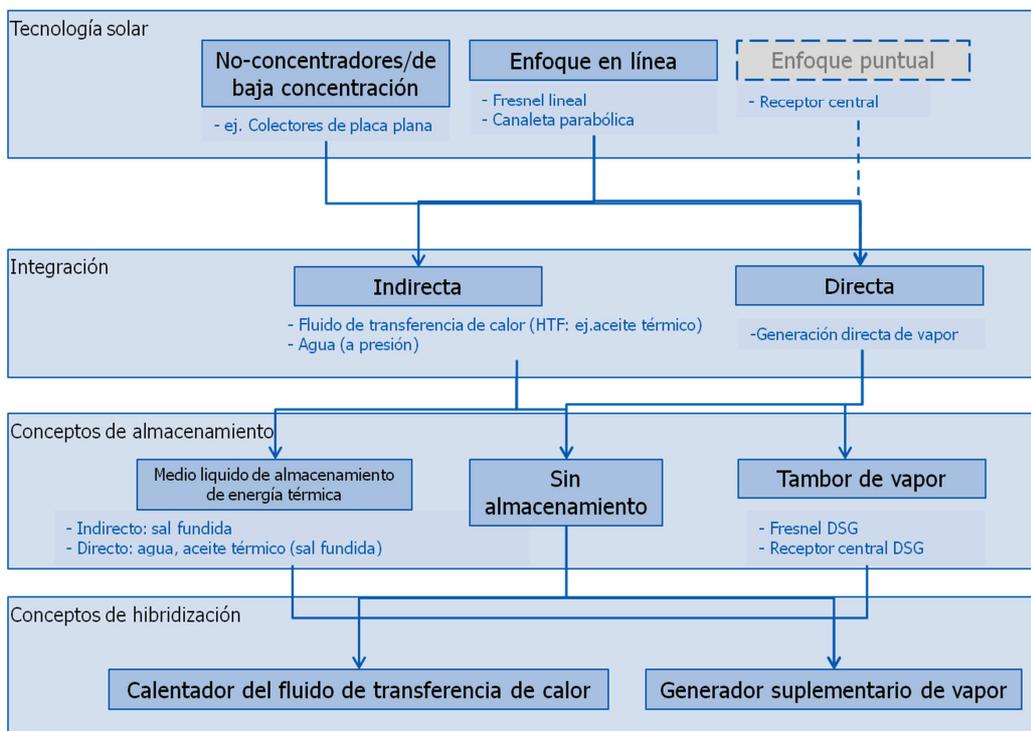


Figura 5-1: Tecnologías disponibles para subsistemas y posibles combinaciones

5.1 Conceptos y configuraciones disponibles

5.1.1 HTF sintético y acumulación con sal fundida

La idea básica tras este concepto es usar subsistemas que han sido probados por años en centrales solar térmicas. La Figura 5-2 muestra la estructura de este concepto en un diagrama de flujo.

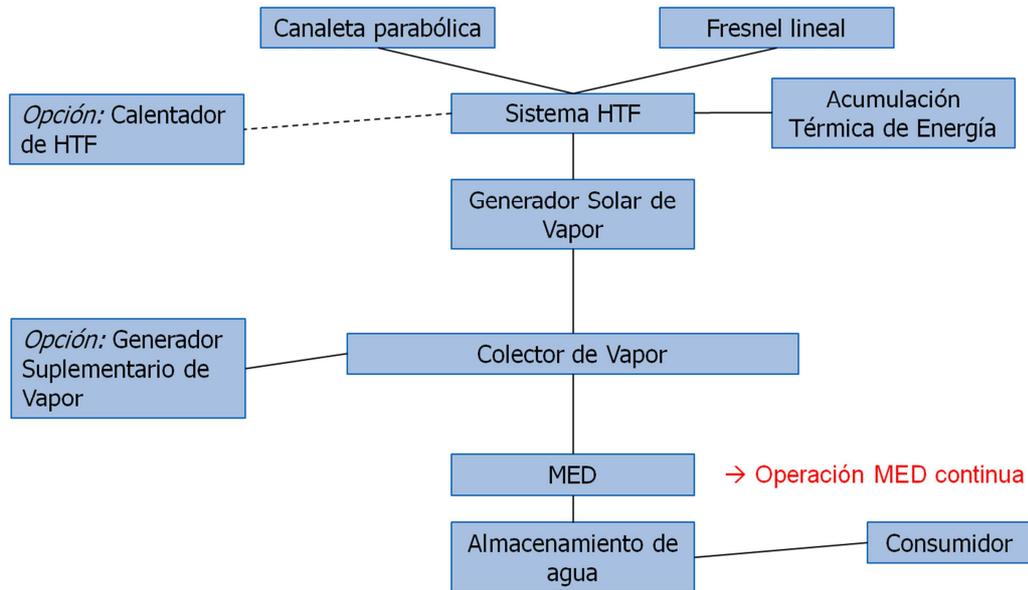


Figura 5-2: Concepto A: HTF sintético y acumulación con sal fundida

En cuanto a la tecnología de colectores, sirven tanto los colectores de canaleta parabólica, como los colectores Fresnel lineales. La operación con aceite sintético como HTF está probada comercialmente con colectores de canaleta parabólica. Así también la integración de este ciclo con el almacenamiento térmico con sal fundida y dos estanques es un concepto probado en centrales solar térmicas. Si bien el sistema de almacenamiento de calor puede ser diseñado lo suficientemente grande para permitir un factor de capacidad solar cercano al 100%, se recomienda la integración de quemadores suplementarios para garantizar la operación MED continua. El calentador puede ser integrado como calentador de HTF o como un generador suplementario de vapor en el ciclo agua/vapor del MED. La Figura 5-3 muestra un diagrama de flujo de proceso en una configuración con un campo solar de canaletas parabólicas.

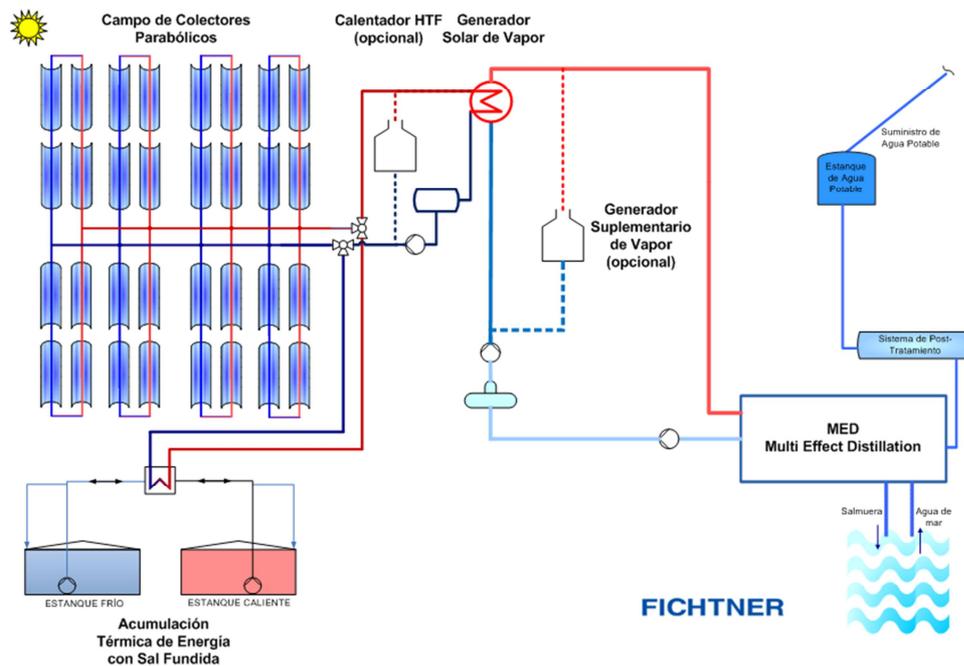


Figura 5-3: Configuración A: HTF sintético y acumulación con sal fundida

En general debe señalarse que subsistemas para esta configuración son diseñados para parámetros de proceso mucho más elevados, que los requeridos por el proceso MED. Especialmente el sistema de almacenamiento térmico con sal fundida exige temperaturas de operación entre 270°C y 390°C. Es teóricamente posible producir los parámetros de vapor requeridos ya en el generador solar de vapor, pero esto se estima técnicamente demandante y altamente ineficiente. Las elevadas temperaturas de proceso en el sistema HTF y TES se traducen en elevados costos de instalación y operación y no ofrecen ninguna ventaja en comparación con la generación a una temperatura más baja.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> Alta estabilidad del suministro de vapor (con apoyo de una caldera de baja presión) Alta contribución solar usando almacenamiento térmico con sal fundida Alta madurez 	<ul style="list-style-type: none"> Elevada diferencia de temperatura entre HTF primario, medio de acumulación térmica y vapor hacia el MED -> cuestionable factibilidad técnica y plausibilidad económica Altos costos de instalación Alta intensidad de O&M Materias de HSE usando aceite sintético

5.1.2 Vapor directo (operación MED continua)

Esta configuración está basada en la pretensión de tener una integración directa del calor solar al proceso MED. Esto deja la generación directa de vapor como único concepto de integración y agua / vapor como el fluido de transferencia de calor en el campo solar. La Figura 5-4 ilustra la idea de este concepto.

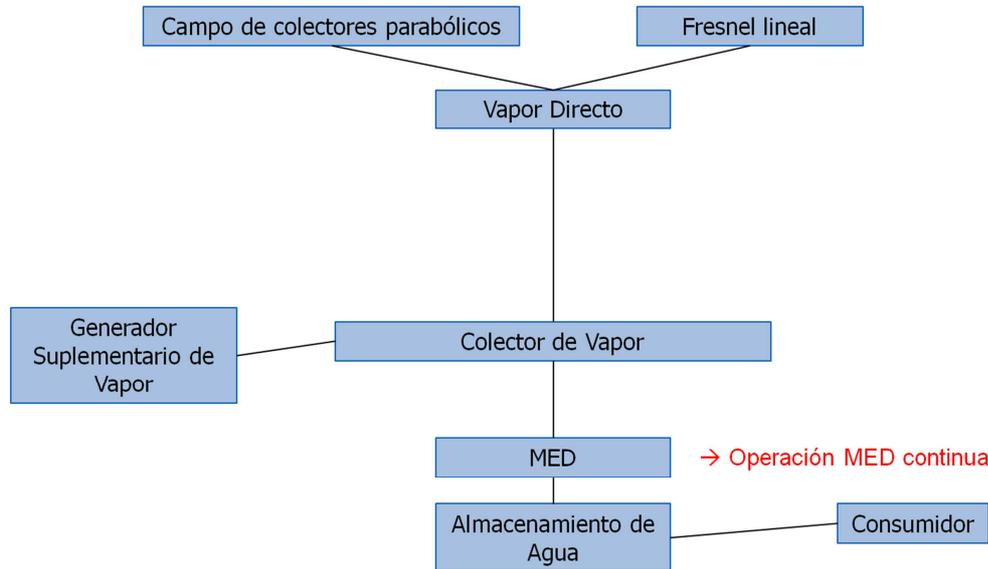


Figura 5-4: Concepto B: Vapor directo, operación MED continua

Los niveles de temperatura en el campo solar son más cercanos a los requerimientos del proceso MED, que en la configuración previa. Se estima como más apropiados los colectores Fresnel lineales. Dado que no existe (no está disponible) un acumulador térmico de largo plazo para una planta solar de generación directa de vapor, con experiencia en proyectos comerciales, se elige un acumulador de vapor para atenuar la fluctuación de la radiación. Este concepto apunta a una operación continua de la planta desalinizadora. Dado que esto no puede implementarse fácilmente para una gran capacidad de almacenamiento, la única manera de asegurar el suministro constante de vapor es instalar un generador suplementario de vapor.

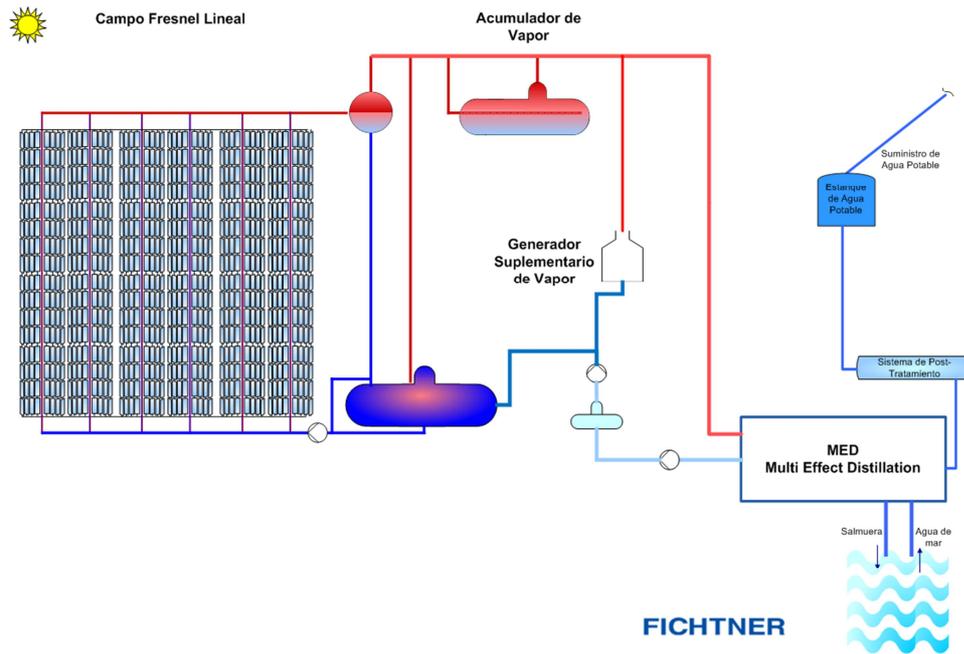


Figura 5-5: Configuración B: Vapor directo, operación MED continua

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> Bajo potencial de riesgo HSE Bajo costo del sistema Baja intensidad de O&M 	<ul style="list-style-type: none"> Alta participación de combustible fósil / baja participación solar

5.1.3 Vapor directo (Operación MED ciclada)

Este concepto persigue el mismo objetivo de integración directa del HTF al ciclo MED, como en el concepto anterior. En contraposición al concepto previo, aquí la ausencia de un generador suplementario de vapor con combustible fósil dicta una filosofía de operación diferente del MED y posibilita una participación solar del 100%. La idea es desalinizar la cantidad completa de agua de producto durante las horas de sol de un día. Por esta razón el agua de producto debe ser almacenada en un gran estanque de agua, desde donde puede ser bombeada al consumidor a un ritmo constante. Para satisfacer la demanda diaria de agua durante las horas de irradiación solar, el MED y otros componentes deben ser diseñados aproximadamente tres veces más grandes que en la configuración descrita en el Capítulo 5.1.2. Sistemas más grandes se traducen en costos de instalación más altos, pero como no hay consumo de combustible fósil, los costos de operación son más bajos.

La Figura 5-6 muestra el concepto en un diagrama de flujo y la Figura 5-7, la configuración tecnológica propuesta.

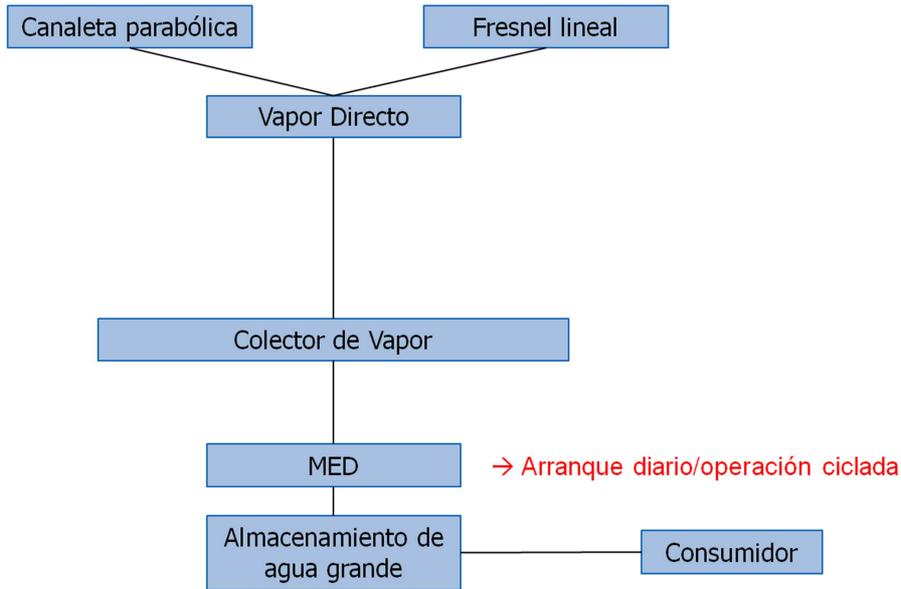


Figura 5-6: Concepto C: Vapor directo, operación MED ciclada

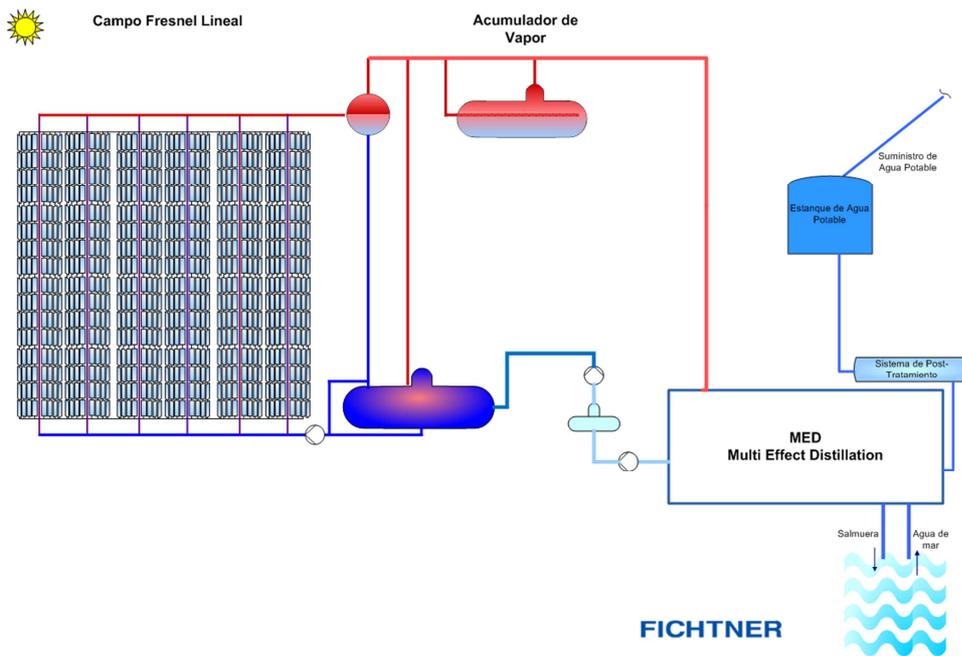


Figura 5-7: Configuración C: Vapor directo, operación MED ciclada

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo potencial de riesgo HSE • Baja intensidad de O&M • 100% de participación solar / sin consumo de combustible 	<ul style="list-style-type: none"> • MED y campo solar sobredimensionados en un factor 3 (comparado con la Configuración B) • Altos costos del sistema • Dificultad de lograr un suministro constante de vapor a MED • Desafíos técnicos relativos al arranque diario de MED

5.1.4 Almacenamiento directo de aceite sintético

En este concepto el aceite térmico usado como HTF también es usado como medio de almacenamiento de calor. La integración directa del acumulador elimina la necesidad de otro intercambiador de calor para el acumulador. Comparado con un sistema de almacenamiento con sal fundida, este sistema tiene una complejidad mucho menor. Sólo se requiere un intercambiador de calor para transferir el calor desde el ciclo solar / estanque de almacenamiento al MED. En este concepto se necesita una gran cantidad de aceite sintético; el tamaño del estanque de almacenamiento deberá ser determinado en una optimización técnico-económica.

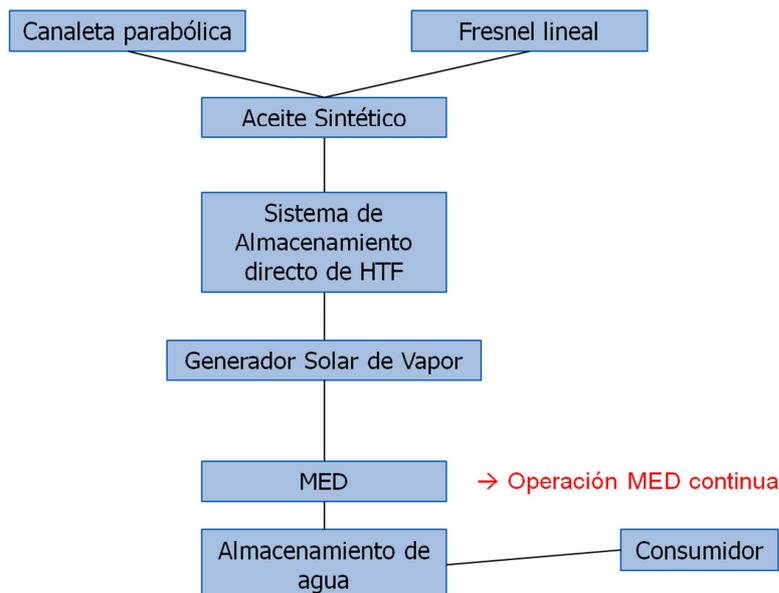


Figura 5-8: Concepto D: Almacenamiento directo de aceite sintético

Basado en la evaluación del tamaño del estanque de almacenamiento, también debe identificarse la necesidad de un calentador suplementario. En el caso que un acumulador lo suficientemente grande para garantizar un flujo constante de vapor no sea factible, será necesario un calentador suplementario. Una opción es implementar un calentador de HTF, pero el uso de un generador suplementario de vapor se estima más beneficioso, dado que la integración directa de calor al ciclo de vapor tiene mayor eficiencia y no se esperan ventajas secundarias de un calentador de HTF. Ambas posibilidades están indicadas en la Figura 5-9.

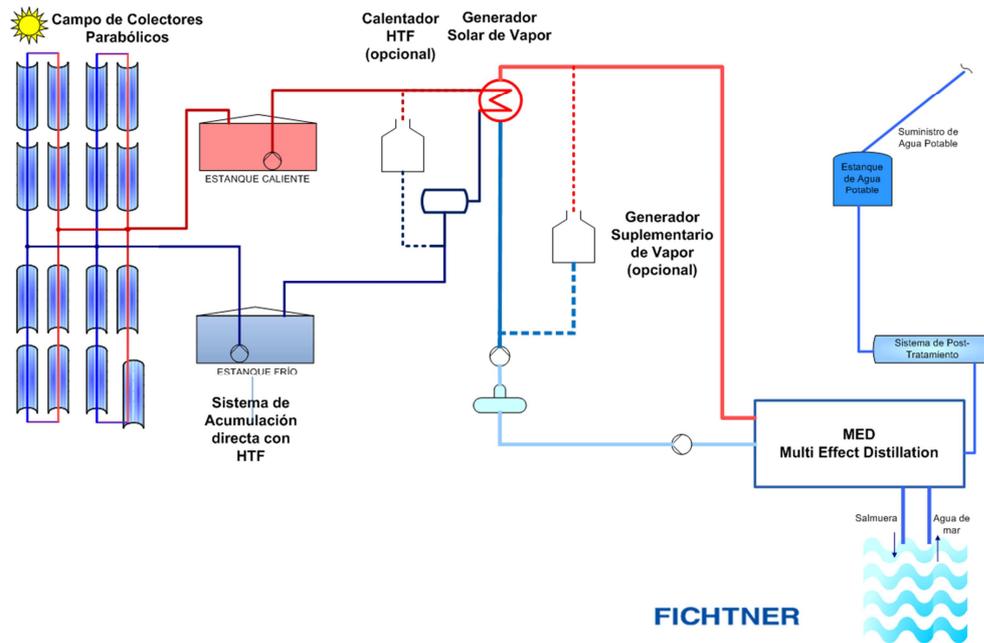


Figura 5-9: Configuración D: Almacenamiento directa de aceite sintético

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> Alta participación solar al utilizar HTF / TES directa 	<ul style="list-style-type: none"> Elevados costos de instalación Materias de HSE al usar aceite sintético como HTF

5.1.5 Almacenamiento directo de agua a presión

En este concepto se usa agua líquida como HTF en el campo solar, integrándola directamente como medio de almacenamiento. Para hacer posibles temperaturas de almacenamiento alrededor de 120 °C, el sistema está presurizado a aproximadamente 2 bar. Un sistema de dos estanques de almacenamiento sería una de las configuraciones posibles, pero se estima más conveniente y rentable un sistema de estanque termoclina. Dado que las temperaturas del campo solar y del sistema de almacenamiento térmico son las más bajas entre todas las configuraciones presentadas, se estima aquí más factible el uso de colectores no-concentradores o de baja concentración. Las ventajas son no sólo los costos más bajos de instalación del campo solar, sino también una menor complejidad de O&M, porque el campo solar no tiene partes móviles algunas. Más aún, la utilización de la radiación solar difusa favorece este tipo de campo solar.

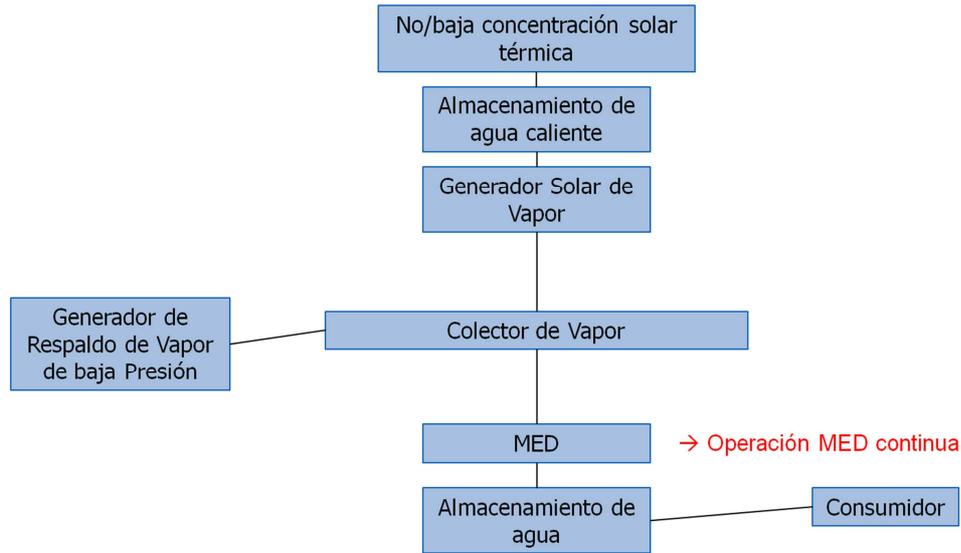


Figura 5-10: Concepto E: Almacenamiento directo con agua a presión

El vapor para el MED es proporcionado por el generador solar de vapor, el que es calentado mediante agua caliente del acumulador o en el campo solar, respectivamente. Aunque puede realizarse una gran capacidad de almacenamiento de calor, aún podría ser necesario o favorable un calentador suplementario. Esto podría ser implementado como un calentador de agua haciendo circular el contenido del estanque de almacenamiento o como generador suplementario de vapor el cual podría ser operado separadamente.

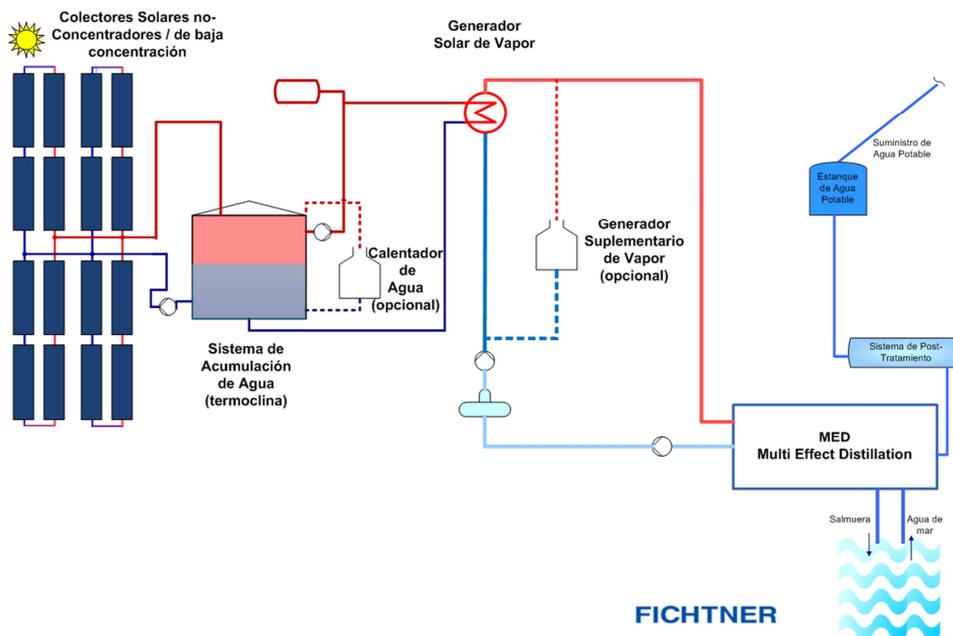


Figura 5-11: Configuración E: Almacenamiento directo con agua a presión

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Es posible alta participación solar usando almacenamiento directo con agua a presión • No hay asuntos de HSE al usar agua como HTF • Baja complejidad de O&M, potencialmente sin partes móviles en el campo solar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos de instalación para el almacenamiento de agua (estanque de gran capacidad)

5.2 Selección de la configuración para la evaluación financiera

Con el fin de enfocar el trabajo siguiente en las configuraciones con las mejores expectativas de competitividad económica, se ha hecho una preselección con ayuda de los siguientes criterios:

Participación solar

Se considera como participación solar la porción de energía suministrada por el campo solar en relación a la energía suministrada por un quemador fósil suplementario. Una alta participación solar implica bajos costos de operación, pero al precio de un campo solar más grande y, por lo tanto, más costoso.

Performance del sistema

En este estudio la performance del sistema (coeficiente de rendimiento) ha sido analizada con respecto a la estabilidad del flujo de vapor hacia el MED y la idoneidad de los parámetros de proceso posibles de lograr.

Costo de instalación

En esta categoría son evaluados los costos esperados de instalación. Normalmente el campo solar juega un papel muy importante a este respecto, pero también pueden jugar un rol importante costosos sistemas de almacenamiento térmico o de transferencia de calor. En este contexto normalmente tienen ventaja configuraciones con una menor participación solar y con costos adicionales de calentamiento con combustibles fósiles.

Complejidad de O&M

En esta categoría son considerado los costos de combustible o de material, así como los costos esperados de mantenimiento del sistema. Dado que a toda costa debe ser evitada una contaminación del agua de producto, deben ser tomadas medidas especiales cuando se usan fluidos potencialmente dañinos en el sistema (problemática HSE).

La matriz de comparación mostrada en la Figura 5-2 resume los resultados clave de cada configuración para los diferentes criterios de evaluación.

	Config. A HTF sintético y almacenamiento con sal fundida	Config. B Vapor directo (operación MED continua)	Config. C Vapor directo (operación MED ciclada)	Config. D HTF sintético almacenamiento directo	Config. E Almacenamiento directo con agua a presión
Participación solar / consumo de combustible	+ Alta participación solar posible mediante capacidad de almacenamiento	- Baja participación solar	+ Participación solar 100% (mediante diseño del campo solar y de MED)	+ Alta participación solar posible mediante capacidad de almacenamiento	+ Alta participación solar posible mediante capacidad de almacenamiento
System performance	+ Stable production - High solar field temperature (thermal losses) - High temperature difference between steam cycle and HTF cycle	+ Producción estable (fósil) + Baja temperatura del campo solar adecuada para MED	- Fluctuante / producción sólo de día + Baja temperatura del campo solar adecuada para MED	+ Producción estable + Baja temperatura del campo solar adecuada para MED	+ Producción estable + Potencialmente independiente de DNI => GHI para colectores no concentradores + Baja temperatura del campo solar adecuada para MED
Costos de instalación	- Ciclo HTF separado – costos adicionales - Ciclo solar con altos parámetros excede necesidad de MED	+ Bajo costos de instalación - pequeño campo solar y no tiene almacenamiento	- Alto costos debido a necesidad de sobredimensionar	- Alto costo de instalación por llenado con HTF (campo solar y almacenamiento)	+ Costo potencialmente bajo del campo solar + Bajo costo de HTF (agua como medio HTF y de almacenamiento)
Complejidad de O&M	- Sistema muy complejo implica alto esfuerzo de O&M - Desafíos operacionales para asegurar HSE con uso de aceite sintético y sal fundida	+ Baja complejidad del sistema - Pequeño campo solar y no hay amenazas por HTF usado	+ Idem Config. B, pero con campo solar de mayor tamaño	- Moderada complejidad del sistema - Desafíos operacionales para asegurar HSE con uso de aceite sintético	+ Baja complejidad del sistema + Potencialmente sin partes móviles en el campo solar + Sin amenazas debido a HTF
Idoneidad general	Baja	buena	Buena (por confirmar)	Moderada	Buena

Figura 5-12: Matriz de comparación para la selección de configuraciones

Cuando se analizan las alternativas tecnológicas con las condiciones de borde fijadas para este estudio, se destacan dos criterios importantes que serán usados como guía para la selección de los conceptos más adecuados.

En primer lugar debe decidirse si la operación 24/7 de la planta MED es más beneficiosa, o si son más favorables los arranques diarios. Después de escoger entre los diseños y filosofías de operación, la segunda pregunta sería con qué punto de hibridización con combustible fósil o almacenamiento de energía térmica se logran los mejores resultados. Seleccionando las configuraciones B, C o E para la investigación financiera, estas preguntas esenciales pueden ser evaluadas adecuadamente.

Por otra parte las configuraciones A y D, que utilizan aceite sintético como fluido de transferencia de calor, presentan ciertos problemas con respecto a salud, seguridad y medio ambiente. La configuración A fue excluida además, porque el sistema trabaja con altas temperaturas. En este caso esto no es tan valioso como en los procesos de generación eléctrica, dado que el MED requiere de parámetros de proceso más bajos. Por último, la configuración D implica elevado CAPEX por el alto costo para HTF / medio de almacenamiento.

6 Comparación Técnico Económica de los Conceptos Seleccionados

6.1 Suministro de agua de mar al sitio de desalinización

Como se mencionara anteriormente, no se encontró ningún área adecuada en la costa para construir una planta desalinizadora solar térmica dentro de la zona objetivo definida por el Cliente. Adicionalmente, ciertos fenómenos climáticos reducen fuertemente la irradiación disponible en los lugares costeros.

El Cliente entonces decidió considerar un lugar al interior del país en la meseta del Norte Chileno. Como resultado de esta nueva ubicación, debe ser considerado en el análisis el bombeo hasta la planta de desalinización solar térmica.

La tabla siguiente presenta el CAPEX y el OPEX a considerar para la tubería y el bombeo de agua de mar, como costo incremental a los costos de tuberías y bombeo aplicables para el estado del arte (bombeo de agua de producto RO hasta las montañas).

Tabla 6-1: Datos clave para bombeo de agua de mar al sitio de desalinización solar

Parámetro	Unidad	Valor
Demanda incremental de energía eléctrica	kWh/(m ³ /d)	4,5
CAPEX incremental para instalación de tuberías (13 km)	Millones de US \$	20
OPEX incrementales fijos para las instalaciones de tuberías	US\$/(m ³ /d)	despreciable

La demanda incrementa de energía eléctrica es la energía eléctrica adicional necesaria para bombear agua adicional al sitio de desalinización a 1000 m. Si el sitio de desalinización está ubicado a 1000 m, debe conducirse el agua de mar hasta allí, mientras que en el caso base sólo se bombea agua de producto desde el mar hasta el consumidor. La demanda adicional de bombeo, desde ese lugar hasta el consumidor, es considerada idéntica para ambas alternativas. Dado que la mayor parte del agua bombeada hasta el sitio de desalinización solar es devuelta al mar, se ha considerado recuperación de energía de la salmuera.

Basado en la tecnología MED debe suponerse que el flujo de agua de mar de alimentación a la planta es alrededor de 5 veces el flujo deseado del agua de producto. Los valores deben ser en m³ por día. El flujo de salmuera a ser devuelto al mar es, por lo tanto, alrededor de 4/5 del flujo de bombeo de agua de mar. Este flujo puede ser utilizado para recuperar una buena parte de la energía necesaria para bombear.

El cálculo de la potencia de bombeo está basado en la ecuación para la energía potencial:

$$P_{bombeo} = \dot{m} \cdot g \cdot h \cdot \frac{1}{\eta_{bomba}}$$

donde \dot{m} se calcula del necesario flujo volumétrico y de las siguientes densidades: 1 kg/l para el agua de producto, 1,025 kg/l para agua de mar y 1,034 kg/l para la salmuera.

En el caso de RO, los 43.200 m³/d corresponden a 0,5 m³/s y por lo tanto a 500 kg/s. En el caso de MED, donde el agua cruda debe ser bombeada hasta el sitio de desalinización solar, el flujo másico es de 2.563 kg/s. Se ha usado 9,81 m/s² como constante gravitacional y la altura fue fijada en 1000 m. El η_{bomba} incluye la eficiencia del motor y ha sido fijado en 85 %.

El mismo enfoque fue usado en el cálculo de la potencia recuperada por una turbina hidráulica en la descarga de salmuera:

$$P_{turbina} = \dot{m} \cdot g \cdot h \cdot \eta_{turbina}$$

El flujo másico usado fue de 2,068 kg/s, correspondiente a 4/5 del agua cruda suministrada al sitio de desalinización (y las correspondientes densidades). La eficiencia de la turbina también incluye la eficiencia del generador. La Tabla 6-2 muestra las bases de cálculo y los resultados.

Tabla 6-2: Demanda eléctrica incremental para bombear agua de mar al sitio de desalinización solar

Parámetro	Unidad	Agua de mar para desalinización	Agua de producto RO
Flujo de bombeo	m ³ /d	216.000	43.200
Flujo de retorno	m ³ /d	172.800	-
Eficiencia de bombeo	%	85	85
Eficiencia de recuperación de energía	%	85	-
Diferencia de altitud/carga de presión	m	1,000	1000
Carga de fricción	m	60	60
Potencia de bombeo	MW	31	6
Potencia recuperada	MW	17	-
Neto	MW	14	6
DELTA	MW	8	
Demanda incremental de energía eléctrica	kWh/m³	4,5	

El CAPEX incremental resultante y la demanda eléctrica incremental serán considerados como corresponde en el análisis financiero.

6.2 Parámetros técnicos clave de los conceptos seleccionados

Los parámetros técnicos clave para los conceptos técnicos seleccionados fueron derivados de los cálculos o datos de referencia y se indican en la tabla siguiente.

Tabla 6-3: Datos técnicos clave para los conceptos seleccionados

Parámetro	Unidad	Línea de base RO	Concepto 1 – Vapor directo Hibridización con DO	Concepto 2 - Vapor directo MED ciclado	Concepto 3 - Sistema de agua a presión
Apertura del campo solar	m ²	NA	195.000	585.000	528.000
Capacidad de almacenamiento	MWht	NA	50	150	1200
Rango de almacenamiento	h	NA	0,5	0,5	12
Múltiplo solar	-	NA	1,3	1,3	4,0
Potencia térmica de diseño a MED	MJ/s	NA	101	303	101
Factor de capacidad anual de desalinización	%	95	95	95	90
Factor anual de capacidad solar	%	NA	32	95	90
Energía térmica anual a MED	GWht	NA	283	840	796
Consumo anual de vapor (LHV)	GWht	NA	655	0	52
Consumo anual de electricidad	GWhe	60	89	89	89
Producción anual de agua	Millones m ³	14,9	14,9	14,9	14,9
Participación solar anual	%	0.0	30	100	94

6.3 Parámetros financieros clave

Los parámetros financieros básicos se muestran en la lista siguiente. Estos valores fueron investigados por el Cliente y revisados por el Consultor. Debe señalarse, que últimamente los precios internacionales del combustible han sido muy volátiles, en parte debido a causas políticas. Estos efectos no fueron considerados, porque se espera que sólo sean de corta duración.

Tabla 6-4: Parámetros financieros básicos

Parámetro	Unidad	Valor
Costo del combustible	\$/litro	0,79
Costo de la electricidad	\$/MWh	120
Vida útil de la planta	años	25
Tasa de descuento	%	8

6.4 Resumen de resultados del análisis financiero

A continuación se presenta un resumen de los principales resultados del análisis financiero. El objetivo de este análisis es calcular el costo nivelado de producción de agua para la tecnología base /estado del arte (RO) y comparar este costo con la producción de agua con los conceptos de tecnología de desalinización solar seleccionados.

Tabla 6-5: Resumen del análisis financiero

Parámetro	Unidad (M = Millón)	Línea de base RO	Concepto 1 – Vapor directo Hibridización con DO	Concepto 2 - Vapor directo MED ciclado	Concepto 3 - Sistema de agua a presión
CAPEX	M US\$	85	195	502	271
OPEX fijo	M US\$	3,5	4,5	5,1	4,6
Costo anual de combustible	M US\$	-	52	-	4,1
Costo anual de electricidad	M US\$	7,1	10,7	10,7	10,7
OPEX total	M US\$	10,5	67,3	15,8	19,5
LCOW	US\$ / m³	1,2	5,8	4,3	3,1

Adicionalmente fueron calculados los costos de producción de agua sin considerar costos adicionales / incrementales por bombeo de agua de mar a la meseta. Esto significa, que la demanda incremental de energía eléctrica de 4,5 kWh/m³ de producción diaria fue sacada del cálculo para identificar qué efecto tendrían estos costos adicionales sobre la viabilidad de los conceptos de desalinización térmica. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 6-6: Resumen del análisis financiero – resultados sin costos de bombeo de agua de mar

Parámetro	Unidad (M = Millón)	Línea de base RO ³⁹	Concepto 1 – Vapor directo Hibridización con DO	Concepto 2 - Vapor directo MED ciclado	Concepto 3 – Sistema de agua a presión
CAPEX	M US\$	85	175	482	251
OPEX fijo	M US\$	3,5	4,5	5,1	4,6
Costo anual de combustible	M US\$	-	52	-	4,1
Costo anual de electricidad	M US\$	7,1	2,7	2,7	2,7
OPEX total	M US\$	10,5	59,2	7,8	11,4
LCOW	US\$ / m³	1,2	5,0	3,6	2,4

6.5 Análisis de sensibilidad

Se han alterado las cifras de CAPEX en el análisis financiero para identificar la sensibilidad del costo nivelado de producción de agua respecto de los costos de inversión. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 6-7: Análisis de sensibilidad CAPEX

Paraámetro	Unidad (M = Millón)	Línea de base RO	Concepto 1 – Vapor directo Hibridización con DO	Concepto 2 - Vapor directo MED ciclado	Concepto 3 – Sistema de agua a presión
CAPEX +10%	M US\$	94	213	553	298
LCOW CAPEX +10%	US\$ / m³	1,3	5,9	4,6	3,3
CAPEX +20%	M US\$	102	232	603	325
LCOW CAPEX +20%	US\$ / m³	1,3	6,0	5,0	3,5
CAPEX -10%	M US\$	77	174	452	244
LCOW CAPEX -10%	US\$ / m³	1,2	5,6	3,9	2,9
CAPEX -20%	M US\$	68	155	402	217
LCOW CAPEX -20%	US\$ / m³	1,1	5,5	3,8	2,8

³⁹ Fuente. Base de datos Fichtner

Además fueron alteradas las cifras de OPEX fijo para identificar la sensibilidad del costo nivelado del agua producida ante variaciones de los costos de operación y mantenimiento. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 6-8: Análisis de sensibilidad OPEX

Parámetro	Unidad (M = Millón)	Línea de base RO	Concepto 1 – Vapor directo Hibridización con DO	Concepto 2 - Vapor directo MED ciclado	Concepto 3 – Sistema de agua a presión
OPEX +10%	M US\$	3,8	4,9	5,6	5,2
LCOW OPEX +10%	US\$ / m³	1,4	5,8	4,4	3,1
OPEX +20%	M US\$	4,1	5,3	6,2	5,6
LCOW OPEX +20%	US\$ / m³	1,3	5,8	4,4	3,2
OPEX -10%	M US\$	3,0	4,0	4,6	4,2
LCOW OPEX -10%	US\$ / m³	1,3	5,8	4,4	3,1
OPEX - 20%	M US\$	2,7	3,5	4,1	3,8
LCOW OPEX -20%	US\$ / m³	1,2	5,7	4,3	3,0

6.6 Desarrollos futuros

Se esperan algunas reducciones de costos para el campo solar y el almacenamiento de calor si son realizados más proyectos de tamaño substancial en los próximos años. Sin embargo, no se esperan mejoramientos del lado técnico; las reducciones de costos serán debido a economía de escala, mejoramientos de la financiación y de la ejecución de proyectos.

Hay desarrollos para mejoramientos futuros de eficiencia de las plantas MED. Se esperan algunos mejoramientos del flujo del proceso y la combinación con el pre-tratamiento de agua que podrían permitir parámetros de proceso mejorados. Sin embargo, dado que la tecnología está siendo desarrollada ya por muchos años, la curva de aprendizaje no será tan empinada que para la más nueva tecnología de osmosis inversa. Mejoramientos en calidad y durabilidad de las membranas probablemente amplíen la brecha entre MED y SWRO en el futuro.

La mayor ventaja de las plantas MED frente a RO debería ser su menor consumo de electricidad. Sin embargo las plantas MED también consumen electricidad y en este caso particular la necesidad de bombear agua cruda hasta el sitio de desalinización reduce esta ventaja. Con futuras reducciones del costo de campos solares de alta temperatura construidos para generación eléctrica y mejoramientos de las membranas SWRO, será más y más seguro que una planta CSP produciendo electricidad para una planta SWRO es más rentable que una planta MED alimentada con vapor solar.

6.7 Exactitud / incertidumbre

Los siguientes factores determinan la exactitud de las estimaciones, respectivamente la exactitud de los cálculos de costo de generación del agua. Se proponen medidas para reducir la incertidumbre.

Tabla 6-9: Estimaciones de exactitud / incertidumbre

Factor / Causa	Incertidumbre aproximada	Medidas propuestas
Datos de plantas RO existentes no de primera mano, sino estimados por el Consultor	+/- 10 %	Contactar a la empresa operadora para recibir información de primera mano
Selección del sitio de proyecto no basada en identificación plena y proceso de selección: efectos específicos del sitio sobre costos de construcción	+/- 15 %	Proceso de identificación y selección del sitio
Datos meteorológicos solares no basados en el sitio específico ni en mediciones de DNI a nivel de suelo	+/- 15 %	Mediciones de DNI en el sitio seleccionado
Concepto técnico preliminar y breve: difícil de estimar / calcular performance técnica	+/- 10 %	Estudio de factibilidad con elaboración del concepto técnico y cálculos exhaustivos de performance
Estimaciones de CAPEX no basadas en concepto plenamente elaborado, ni en cotizaciones de potenciales suministradores	+/- 15 %	Estudio de factibilidad con elaboración del concepto técnico y exhaustiva estimación de costos, incl. pedido de cotización de potenciales suministradores
OPEX igual que CAPEX, concepto de operación y mantenimiento no establecido	+/- 20%	Estudio de factibilidad con elaboración de concepto técnico, concepto de O&M, estimación detallada de costos O&M
Estructura del proyecto y principios específicos de financiación no establecidos	+/- 10%	Estudio de factibilidad, elaborando estructura del proyecto y principios de financiación.

Basado en los factores más relevantes de incertidumbre y considerando efectos compensatorios, la exactitud general del cálculo de costos de producción de agua podría establecerse en el rango de +/- 30%.

6.8 Conclusiones más importantes del análisis financiero

Las siguientes conclusiones más importantes merecen ser destacadas:

- La desalinización solar térmica autónoma utilizando MED y tecnología solar a la medida no es competitiva en costos con la actual tecnología RO.
- Usando un sistema solar de generación directa de vapor e hibridización con una caldera quemando combustible diesel es económicamente mucho menos atractivo, que aumentar la capacidad del MED y del campo solar y operar el MED sólo durante el día.
- Usando agua a presión como fluido de transferencia de calor, incluyendo almacenamiento directo de agua a presión, promete esperar la mejor economía.
- Los grandes esfuerzos y costos asociados para bombear agua da mar hasta la meseta no son el factor decisivo o más relevante al compara el concepto de desalinización solar térmica con el actual concepto tecnológico RO.
- Sin considerar los costos incrementales del bombeo de agua de mar, el CAPEX del concepto con agua a presión debería ser sólo el 30% del valor estimado por el Consultor para equipararse con la actual tecnología RO.