

COMPARACIÓN ECONÓMICA DE PROCESOS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR: EL RETO DE LA DESTILACIÓN MULTI-EFECTO CON ENERGÍA SOLAR

D. Alarcón¹, J. Blanco, E. Zarza, S. Malato, J. León
CIEMAT – PSA, Apto. de correos 22, 04200 Tabernas (Almería), España
Tel.: +34 950387900, Fax: +34 950365015

RESUMEN

La desalación de agua de mar es uno de los campos más prometedores dentro de las aplicaciones de la energía solar térmica debido a la habitual coincidencia, en muchos lugares del planeta, de una escasez de agua potable, la disponibilidad del recurso marino y unos notables niveles de radiación solar. Durante la década de los noventa, la Plataforma Solar de Almería (PSA) llevó a cabo un proyecto de investigación que demostró con éxito la viabilidad técnica de la desalación de agua de mar mediante el uso de colectores solares cilindro-parabólicos acoplados a una planta de destilación multi-efecto convencional. Sin embargo, a pesar de las significativas mejoras que se obtuvieron en la eficiencia energética del proceso mediante el desarrollo e implementación de una bomba de absorción de doble-efecto, esta tecnología no está aún en condiciones de competir, desde un punto de vista económico, con los procesos de destilación térmica convencionales ni con los procesos de ósmosis inversa. Con objeto de cambiar esta situación, durante el año 2002 se ha iniciado un nuevo proyecto de investigación en la PSA con el objetivo de conseguir mejorar tanto la eficiencia económica como la protección del medio ambiente. Las líneas básicas del nuevo proyecto se basan en la incorporación de nuevo colectores solares mejorados y un nuevo prototipo de bomba de absorción, así como la eliminación de cualquier tipo de vertido al medio ambiente. Un análisis preliminar muestra que la nueva tecnología propuesta será completamente competitiva si el coste total asociado al sistema solar se sitúa en torno a los 300 €/m² de colector solar.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escasez de agua, hecho que se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a factores tales como el crecimiento de la población, el desarrollo industrial y cambios en el clima. Muchos de estos lugares poseen abundantes recursos marinos y altos niveles radiación solar, lo cual puede ser aprovechado para producir agua potable a partir del agua de mar. A pesar del enorme potencial que presenta la energía solar térmica en los procesos de destilación térmica de agua de mar, dichos procesos no se han desarrollado aún en el ámbito comercial. Este hecho se debe a que la tecnología actual, a pesar de haber demostrado su viabilidad técnica, es incapaz de competir, desde un punto de vista estrictamente económico, con las tecnologías convencionales de destilación y ósmosis inversa. Sin embargo, también es un hecho reconocido la existencia de un notable margen en la mejora de los sistemas de desalación con energía solar térmica.

Dentro de las aplicaciones de la energía solar térmica en procesos de desalación, los estanques solares representan la mejor alternativa en el caso de que tanto la demanda de agua dulce como el precio del terreno sobre el que se asientan sean bajos. Para demandas mayores es necesario recurrir a plantas convencionales de destilación acopladas a una sistema solar térmico, lo cual se conoce como desalación solar indirecta (García-Rodríguez y Gómez-Camacho, 2001). Los métodos de destilación empleados en la desalación solar indirecta son la destilación súbita multi-etapa (MSF) y la destilación multi-efecto (MED). Aunque la tecnología MED fue la predecesora de la tecnología MSF y además es más eficiente desde un punto de vista termodinámico, su contribución en el mercado mundial ha descendido de un 60% en el año 1958 hasta el 6% actual, debido a problemas tanto de operación como de mantenimiento (Alawadhi, 2002). No obstante, en la última década se ha renovado el interés en la destilación multi-efecto y se puede decir que actualmente los procesos MED están en condiciones de competir técnica y económicamente con la tecnología MSF (Shammiri, 1999). Los avances recientes llevados a cabo en la investigación de procesos a baja temperatura han dado como resultado un incremento de la capacidad desaladora así como una reducción del consumo energético de las plantas MED (Kronenberg, 2001), asegurándose una operación a largo plazo con unas condiciones de estabilidad excepcionales. Se ha conseguido disminuir la formación de incrustaciones y la corrosión, alcanzándose disponibilidades de planta en el entorno del 94% al 96%.

EXPERIENCIAS EN DESALACIÓN EN LA PSA

El CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España) y el DLR (Instituto Aeroespacial Alemán, Alemania) decidieron en 1987 desarrollar un sistema avanzado de desalación basado en energía solar térmica. Para ello iniciaron el denominado Proyecto STD (Solar Thermal Desalination)

¹ Corresponding author: diego.alarcon@psa.es

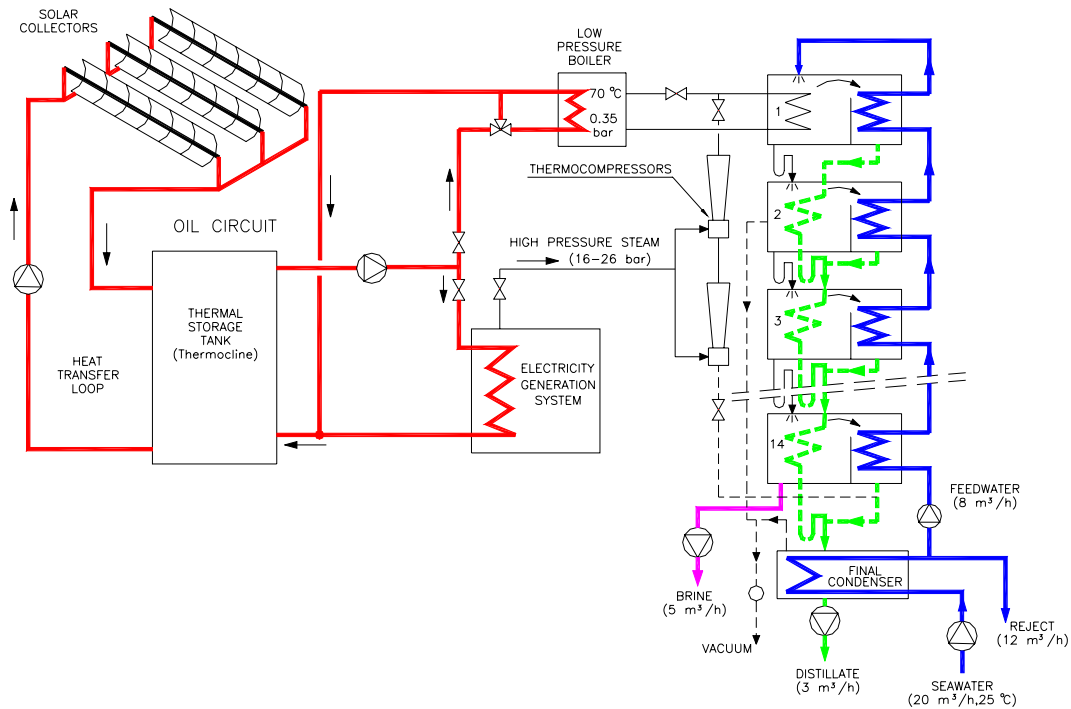


Figura 1: Esquema del sistema solar MED instalado en la PSA durante la Fase I del Proyecto

cuyos trabajos se extendieron hasta el año 1994 (Zarza y Blanco, 1996). Este proyecto estuvo dividido en dos fases, cada una de las cuales persiguió un objetivo específico:

- Fase I: estudiar la fiabilidad y viabilidad técnica de la incorporación de la energía solar térmica en los procesos de desalación de agua de mar.
- Fase II: implementación de mejoras específicas en el sistema instalado en la PSA durante la primera fase, con objeto de hacerlo más competitivo frente a los sistemas de desalación convencionales.

La Fase I del Proyecto STD comenzó en 1988 y su evaluación finalizó en 1990. Durante esta fase se implementó en la PSA un sistema de desalación solar compuesto por: i) Una planta de destilación multi-efecto con 14 efectos; ii) un campo de colectores solares cilindro-parabólicos; iii) un tanque de almacenamiento térmico termoclino.

Dichos subsistemas estuvieron interconectados tal como muestra la Figura 1. El sistema opera con aceite sintético que es calentado mientras circula a través de los colectores solares. La energía solar es convertida de esta forma en energía térmica en forma de calor sensible del aceite, y a continuación es almacenada en el tanque de almacenamiento térmico. El aceite caliente procedente del sistema de almacenamiento es el responsable de suministrar la energía térmica requerida por la planta MED. La planta desalinizadora instalada en la PSA utiliza haces de tubos horizontales sobre los que se pulveriza el agua de mar para producir su evaporación, la cual debe estar limitada a una temperatura de 70°C con objeto de reducir la formación de incrustaciones. La planta MED está compuesta por 14 celdas o efectos, en orden decreciente de temperaturas y presión desde la celda 1 hasta la celda 14. El agua de mar es precalentada de celda en celda en los 13 precalentadores. Desde la celda 1, el agua de mar pasa de una celda a otra por efecto de la gravedad antes de ser extraída de la celda 14 mediante la bomba de salmuera. Parte del agua de mar utilizada como refrigerante del condensador es expulsada y el resto es utilizada para ser pulverizada sobre el haz de tubos de la celda 1. El agua dulce es extraída del condensador por medio de la bomba de destilado.

Durante la Fase I también fue ensayada la incorporación de la compresión térmica de vapor al proceso. Para ello se aprovechó el vapor de alta presión (16-26 bar) generado para hacer funcionar una pequeña planta de electricidad que se encuentra acoplada al campo solar. Una pequeña parte de este vapor es enviada a unos termocompresores, en los cuales se mezcla con el vapor producido en la celda 14. Esta mezcla es inyectada dentro del evaporador de la primera etapa para reiniciar el proceso de desalación. De este modo se consigue que el consumo energético del proceso sea menor.

Tabla 1: Especificaciones Técnicas de la Planta Desaladora de la PSA

Producción nominal de destilado	3 m ³ /h
Consumo de energía térmica	190 kW
Factor de rendimiento (kg destilado/2300 kJ energía térmica suministrada)	>9
Concentración del destilado	50 ppm TDS
Alimentación de agua de mar:	
A 10°C:	8 m ³ /h
A 25°C:	20 m ³ /h
Caudal de alimentación de la celda 1:	8 m ³ /h
Caudal de rechazo:	5 m ³ /h
Número de celdas	14
Sistema de vacío	Hydro-eyectores (agua de mar a 3 bar)

Para evacuar el aire de las etapas al comienzo de la operación se utiliza un sistema de vacío compuesto por dos hidro-eyectores alimentados por agua de mar a 3 bar. Dicho sistema de vacío es también utilizado para compensar las pequeñas cantidades de aire y gases liberadas por el agua de alimentación y las pequeñas pérdidas producidas en las juntas.

Los resultados más notables obtenidos durante la Fase I fueron los siguientes:

- El sistema presentó una alta fiabilidad, no observándose ningún tipo de problema importante a la hora de acoplar el campo de colectores solares a la planta MED.
- Baja inercia térmica: la producción nominal de destilado se alcanzaba transcurridos 35 minutos de la puesta en marcha.
- El consumo específico de electricidad se situó en el rango que va desde los 3.3 hasta los 5 kW_e/m³ de destilado.
- La planta obtuvo un Factor de Rendimiento (número de kg de destilado producidos por cada 2300 kJ de energía suministrada) en un rango de 9.4 a 10.4 si se operaba con vapor de baja presión. Dicho rango se incrementó de 12 a 14 utilizando vapor de alta presión para alimentar la planta.

Como consecuencia de los resultados obtenidos durante la Fase I fue posible la identificación de potenciales

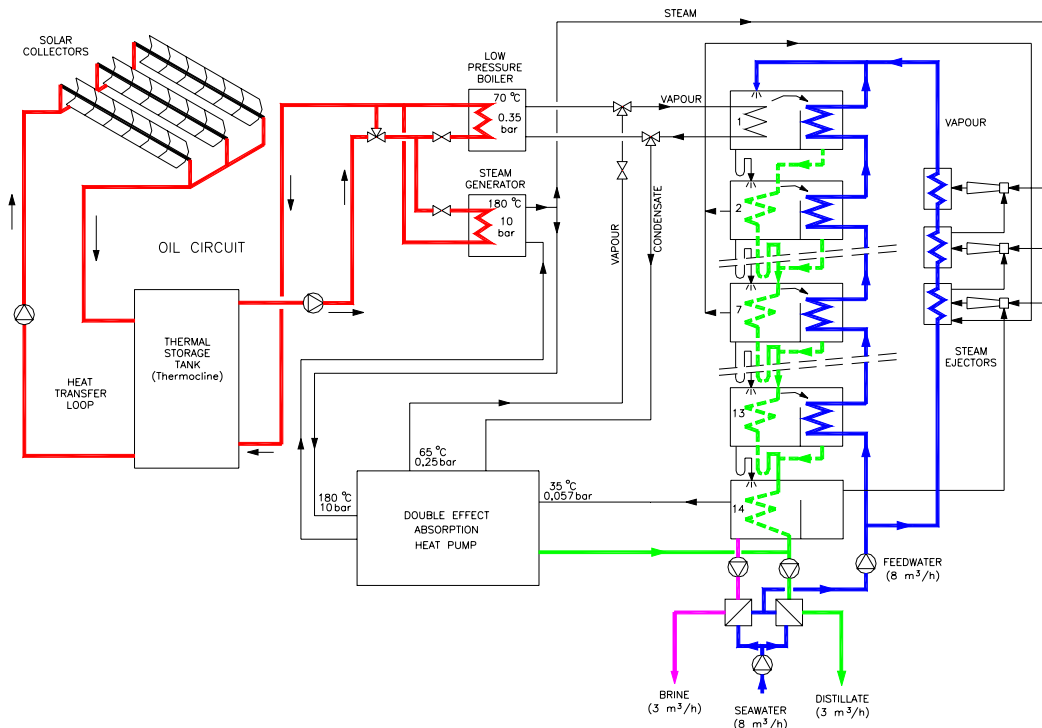


Figura 2: Sistema Solar MED mejorado (Proyecto STD – Fase II)

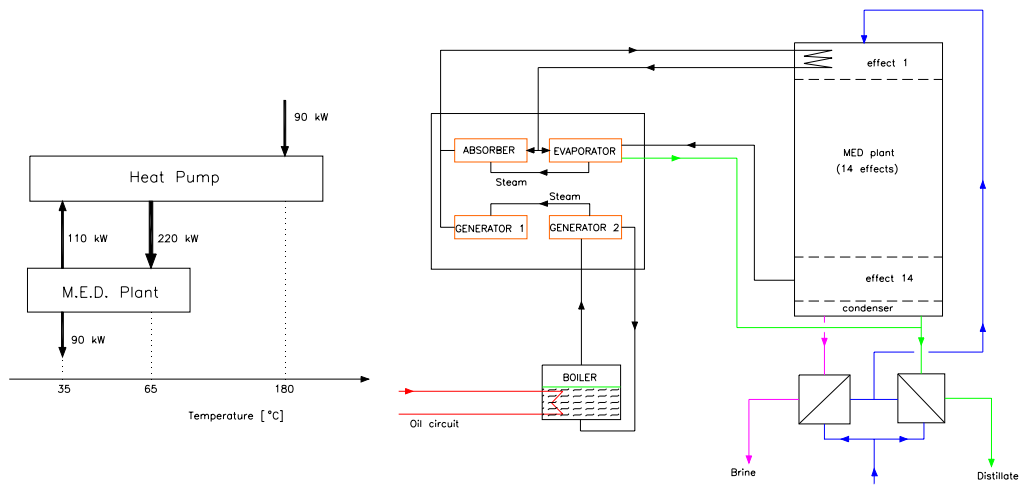


Figura 3: Esquema conceptual de la Bomba de Absorción de Calor de Doble Efecto y su acoplamiento con el Sistema Solar MED

mejoras que en el caso de ser implementadas podrían incrementar la eficiencia y competitividad del sistema. Las principales conclusiones de este análisis fueron las siguientes:

- El consumo eléctrico de la planta podría reducirse mediante la sustitución de sistema de vacío basado en hidro-eyectores por un sistema de eyectores de vapor.
- El consumo térmico de la planta se podría reducir en un 50% mediante la incorporación de una bomba de absorción de doble efecto acoplada a la planta MED.

Puesto que las mejoras anteriormente citadas podrían reducir considerablemente el coste específico del destilado producido por el sistema, se decidió acometer la Fase II del proyecto STD. Las Figuras 2 y 3 muestran un esquema del sistema de desalación mejorado en el cual se ha acoplado una bomba de absorción de calor de doble efecto a la planta MED. La bomba de calor es capaz de suministrar 200 kW de energía térmica a 65°C a la planta MED. El proceso de desalación en la unidad de evaporación sólo utiliza 90 kW de esos 200 kW, mientras que el resto (110 kW) son recuperados por el evaporador de la bomba de calor a 35°C y bombeados a una temperatura de operación de 65°C. Para ello, la bomba necesita 90 kW de energía térmica a 180°C. De esta manera el consumo del sistema total se redujo de 200 kW a 90 kW.

Las mejoras implementadas en el sistema desalador (bomba de absorción de calor y sistema de vacío basado en eyectores de vapor) redujo el consumo de energía térmica en un 44%, de 63 a 36 kWh/m³ y el consumo eléctrico en un 12%, de 3.3 a 2.9 kWh/m³.

SISTEMAS MED DE DESALACIÓN SOLAR AVANZADA: EL PROYECTO AQUASOL

En virtud de su experiencia previa, durante el año 2001 un nuevo proyecto denominado “Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technology” (AQUASOL) fue aprobado por la Comisión Europea y sus actividades se han iniciado en el año 2002. La Tabla 2 muestra la lista de participantes en el proyecto.

El proyecto está enfocado en el desarrollo tecnológico de tres aspectos fundamentales, los cuales se espera que mejoren de manera significativa la actual eficiencia tecno-económica de los sistemas solares MED y en consecuencia, se reduzca el coste de producción de agua desalada:

- Incorporación eficiente de la energía solar al proceso mediante el diseño de un sistema de colectores estáticos, del tipo CPC (Concentradores Parabólicos Compuestos), para suministrar calor a media temperatura (70°C-100°C)(Ver Figura 4). Este sistema de colectores solares se verá complementado por un tanque de almacenamiento térmico de agua, y el sistema completo estará acoplado a una caldera de gas con objeto de garantizar las condiciones de operación necesarias y permitir una operación de la planta MED durante las 24 horas del día (necesario para reducir costes de capital).
- Desarrollo de una nueva Bomba de Absorción de Calor de Doble Efecto (DEAHP) optimizada y plenamente integrada dentro del proceso MED con objeto de reducir de manera significativa la energía total necesaria y mejorar la eficiencia global del proceso.

Tabla 2: Lista de participantes en el Proyecto AQUASOL

Organización	País
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas	España
Instalaciones Inabensa S.A.	España
Caja Rural Intermediterránea CAJAMAR	España
Comunidad de Regantes las Cuatro Vegas de Almería	España
Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial	Portugal
AO SOL, Energias Renováveis, Lda.	Portugal
Hellenic Saltworks S.A.	Grecia
National Technical University of Athens	Grecia
WEIR Entropie S.A.	Francia

- Reducir a cero cualquier vertido del proceso mediante la recuperación de la sal contenida en la salmuera. Para ello se diseñará y desarrollará un secador solar avanzado cuyo propósito es acelerar el proceso anteriormente descrito. La eliminación de la salmuera podría provocar una mejora adicional de la economía del proceso.

La Figura 5 muestra un diagrama conceptual del sistema propuesto. La energía suministrada por el campo solar es transferida a un tanque de almacenamiento térmico que utiliza agua como fluido de trabajo. Este tanque de almacenamiento estará conectado a una caldera de gas que generará el vapor a 180°C y 10 bar necesario para la operación normal de la bomba de calor. El sistema también puede funcionar en modo “sólo-solar” mediante una caldera de baja presión conectada al tanque de almacenamiento, la cual genera el vapor que alimenta el primer efecto de la planta MED. Sin embargo, esta opción reduce a la mitad la eficiencia global del sistema.

Los dispositivos CPC tiene la mejor óptica posible para proporcionar energía térmica en un rango medio de temperaturas puesto que son los únicos capaces de conseguir concentrar la radiación solar sin la ayuda de ningún mecanismo de seguimiento. Esto se traducirá, sin duda, en unos costes de instalación y mantenimiento menores que los que se obtendrían con colectores cilindro-parabólicos dotados de su correspondiente sistema de seguimiento solar.

La eliminación total de emisiones mejorará el proceso global no sólo desde el punto de vista medioambiental, sino también del económico puesto que la sal obtenida por cada metro cúbico de salmuera puede ser incluso más valioso que el destilado obtenido. Se espera, al menos, lograr doblar la ratio de producción de una salinera convencional.

Finalmente, la viabilidad técnica del concepto de DEAHP está completamente asegurada por la experiencia anterior de la PSA, constituyendo una clara contribución a la reducción del coste del agua producida mediante procesos MED con energía solar (Zarza y Blanco, 1996).

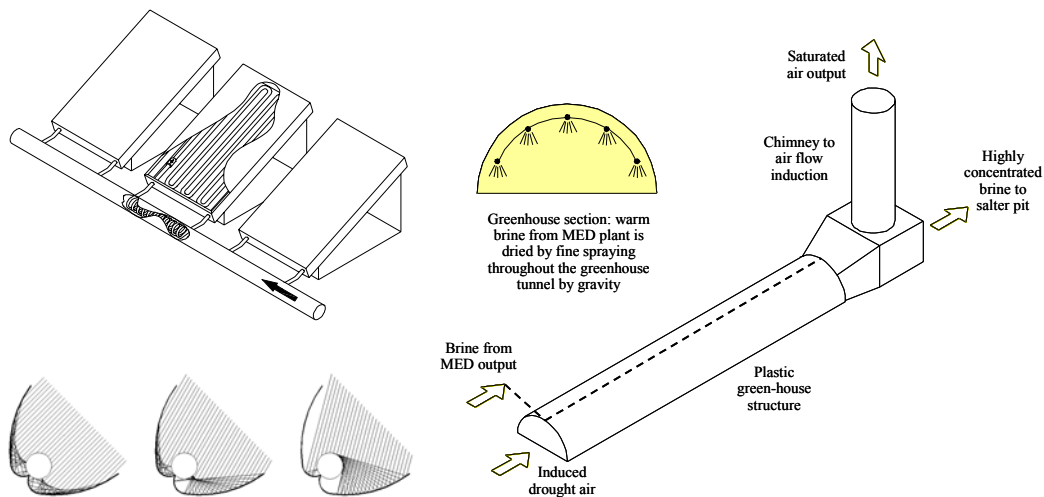


Figura 4: Ejemplos de dos de las innovaciones tecnológicas a implementar dentro del proyecto AQUASOL: colector solar estático (izq.) y secador solar avanzado (der.)

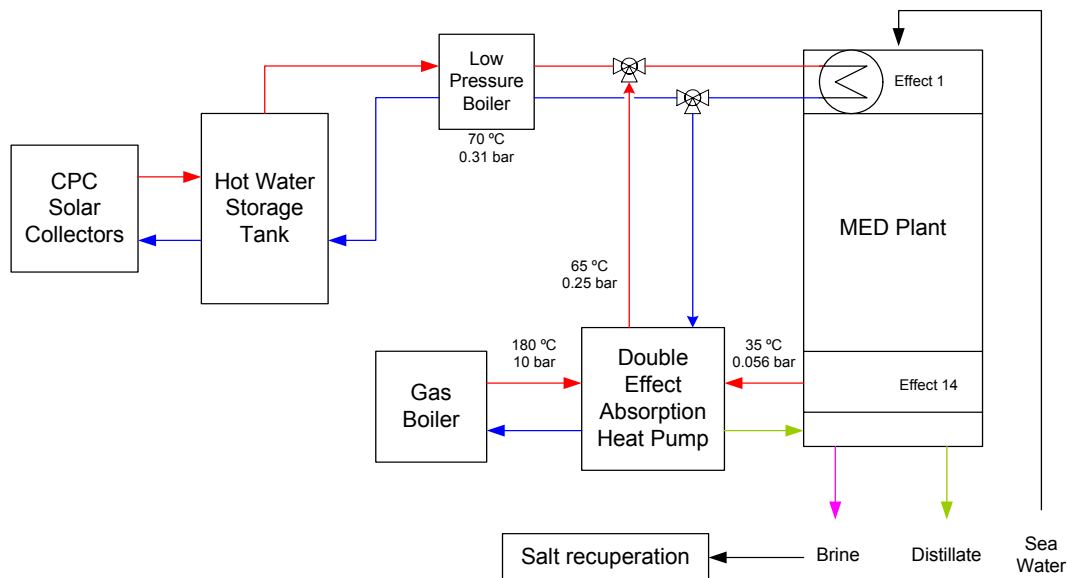


Figura 5: Diagrama conceptual del sistema propuesto en el Proyecto AQUASOL

LOS COSTES DE LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR

En los últimos años se ha producido una considerable reducción en los costes del agua potable obtenida a partir de plantas desaladoras (Wangnick, 2001). Por otra parte, el coste del agua producida mediante plantas de tratamiento convencional ha aumentado debido a la sobreexplotación de los acuíferos, la contaminación de las aguas subterráneas y la intrusión salina. En países tales como los de la región del Golfo Pérsico, la desalación de agua de mar es una técnica plenamente utilizada y competitiva, y esta situación está cerca de convertirse en realidad en otros muchos lugares del mundo debido al continuo incremento de la demanda de agua dulce y una reducción paralela en la disponibilidad de la misma por las razones anteriormente mencionadas.

Tabla 3: Costes de instalación y operación para las diferentes tecnologías de desalación (Valero et al., 2001)

	MSF	MED-TVC	MVC	RO ^a
Costes de instalación (€/m ³ /day)	1080 – 1690	780 – 1080	1020 – 1500	660 – 1200
Consumo energético (MJ/m ³) ^b	194 – 291	145 – 194	0	0
Consumo electricidad (kW _h /m ³)	3.5 – 4.0	1.5 – 2.0	9 – 11	3 – 4.5
Operación y mantenimiento (€/m ³)	0.05 – 0.07	0.04 – 0.07	0.05 – 0.08	0.05 – 0.10
Recambios y prod. químicos (€/m ³)	0.02 – 0.04	0.02 – 0.03	0.02 – 0.04	0.02 – 0.05
Reemplazo de membranas (€/m ³)	0	0	0	0.01 – 0.04

^a Capacidad de planta entre 10.000 – 100.000 m³/día

^b GOR(MSF) = 8-12, GOR(MED-TVC) = 12-16

La Tabla 3 muestra los costes de instalación y operación para las principales tecnologías utilizadas en la desalación de agua de mar (Valero et al., 2001): Destilación súbita multi-etapa (MSF), destilación multi-efecto con compresión térmica de vapor (MED-TVC), compresión mecánica de vapor (MVC) y ósmosis inversa (RO). Wade (2001) llevó a cabo una comparación de los costes de producción de agua mediante procesos de destilación térmica (MSF, MED) y ósmosis inversa (RO, RO+Brine Booster). Para ello, llevó a cabo un estudio de cuatro plantas con la misma capacidad de desalación (31.822 m³/día), operando en el área mediterránea y con un coste de combustible de 1.7 €/GJ. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Hoy en día, la energía solar no puede aún competir con los precios de los combustibles fósiles. Para lograr dicha competitividad, en el caso de plantas de desalación híbridas solar-fósil, es necesario reducir la repercusión del coste del hardware solar en el coste final del agua, en función del coste de los combustibles fósiles. El-Nashar (2001) estimó que para un coste del combustible fósil de 11 €/GJ, una pequeña planta MED alimentada sólo con energía solar por medio de colectores estáticos puede obtener agua potable a un coste cercano al de una planta convencional si el coste del colector solar se sitúa en torno a los 300 €/m².

Tabla 4: Estimación de costes de agua de mar desalada con diferentes tecnologías convencionales (Wade, 2001)

MSF	1.18 €/m ³
MED	1.08 €/m ³
RO	0.93 €/m ³
RO + brine booster	0.85 €/m ³

La Figura 6 muestra una estimación aproximada de coste equivalente del hardware solar frente al coste del combustible fósil con objeto de obtener el mismo coste en el producto destilado que se obtendría con una planta que operase al 100% con dicho combustible fósil. El objetivo buscado con la tecnología propuesta dentro del Proyecto AQUASOL es intentar aproximarse a estas cifras tanto como sea posible. En particular, este resultado ha sido obtenido considerando una planta comercial MED típica con las siguientes características: GOR=7.5; Producción = 9600 m³/día, 90% disponibilidad, período de amortización de 15 años y una fracción solar del 50%.

Esto significa que si el coste equivalente total del campo de colectores solares se encuentra en el rango que va desde los 230 a los 390 €/m², el coste del agua obtenida mediante una planta MED híbrida solar-gas (50-50) sería el mismo que el obtenido mediante una planta MED convencional (asumiendo producción en serie de grandes plantas solares).

CONCLUSIONES

La escasez de agua es un problema cada vez más importante que afecta a todo el planeta y es evidente que la desalación de agua de mar puede ayudar a paliar esta situación. Entre las fuentes de energías adecuadas para hacer funcionar los procesos de desalación, la energía solar es una de las opciones más prometedoras, debido a la habitual coincidencia en muchos lugares del mundo en cuanto a disponibilidad de radiación solar y demanda de suministro de agua dulce. Durante la década de los noventa, el Proyecto de Desalación Solar Térmica llevado a cabo en la Plataforma Solar de Almería demostró la viabilidad técnica de la desalación de agua de mar con energía solar térmica, a través del acoplamiento de un campo de colectores solares cilindro-parabólicos con una planta convencional de destilación multi-efecto. A pesar de ello, esta tecnología no puede actualmente competir, desde un punto de vista económico, con otras tecnologías de desalación convencionales, a menos que se lleven a cabo mejoras adicionales.

Un nuevo proyecto, denominado AQUASOL, se ha iniciado en el año 2002 con el fin de intentar mejorar el sistema solar anteriormente propuesto. El objetivo del Proyecto AQUASOL es el desarrollo de una tecnología de desalación de agua de mar de menor coste y mayor eficiencia energética, basada en el proceso de destilación multi-efecto con emisión nula de salmuera. Se espera que los desarrollos tecnológicos específicos propuestos (nuevos diseños de colector CPC y bomba de absorción, hibridación con gas natural y recuperación de la sal) mejoren tanto la eficiencia energética del proceso como la economía del mismo. El resultado esperado sería una

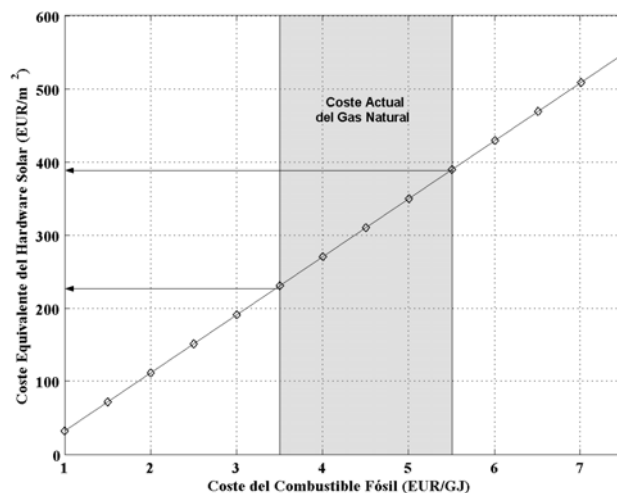


Figura 6: Coste equivalente estimado del hardware solar frente al coste del combustible fósil para obtener el mismo coste de producción que una planta MED convencional (Contribución solar del 50%)

tecnología MED mejorada con posibilidades de mercado y adecuada para ser implantada en el área mediterránea y localizaciones similares en el resto del planeta. Para un coste del combustible fósil (ej. gas natural) de 4.5 €/GJ, el coste necesario del hardware solar asociado (considerando una contribución del 50% al sistema total) para conseguir la competitividad económica con plantas MED convencionales, se sitúa en torno a 300 €/m² de colector solar.

NOMENCLATURA

<i>CIEMAT</i>	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
<i>CPC</i>	Concentrador Parabólico Compuesto
<i>DEAHP</i>	Bomba de absorción de calor de doble efecto
<i>DLR</i>	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
<i>GOR</i>	Gain output ratio (kg de destilado producido por kg de vapor empleado)
<i>MED</i>	Destilación multi-efecto
<i>MSF</i>	Destilación súbita multi-etapa
<i>MVC</i>	Compresión mecánica de vapor
<i>PSA</i>	Plataforma Solar de Almería
<i>RO</i>	Ósmosis inversa
<i>STD</i>	Proyecto de Desalación Solar Térmica
<i>TDS</i>	Concentración total de sólidos en disolución
<i>TVC</i>	Compresión térmica de vapor

REFERENCIAS

- Al-Shammiri M. and Safar M. (1999) Multi-effect distillation plants: state of the art. *Desalination* **126**, 45-59.
- Alaadhi A.A. (2002) Desalination – where are we now? GCC Countries. *Desalination & Water Reuse* **12**(1), 12-21.
- El-Nashar A.M. (2001) The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas. *Desalination* **134**, 173-186.
- García-Rodríguez L. and Gómez-Camacho C. (2001) Perspectives of solar-assisted seawater distillation. *Desalination* **126**, 213-218.
- Kronenberg G. and Lokiec F. (2001) Low-temperature distillation processes in single- and dual-purpose plants. *Desalination* **136**, 189-197.
- Valero *et al.* (2001) La Desalación como Alternativa al Plan Hidrológico Nacional. CIRCE-Universidad de Zaragoza Report. January 2001.
- Wade N.M. (2001) Distillation plant development and cost update. *Desalination* **136**, 3-12.
- Wangnick K. (2001) A global overview of water desalination technology and the perspectives. Paper presented at the *International Conference Spanish Hydrologic Plan and Sustainable Water Management: Environmental aspects, water reuse and desalination*, Zaragoza(Spain), 13-14 June 2001.
- Zarza E. and Blanco M. (1996) Advanced M.E.D. solar desalination plant: Seven years of experience at the Plataforma Solar de Almería. In: *Proceedings of the Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini (Greece), 10-12 June 1996, pp. 45-49.