

DESALINIZACIÓN DE AGUA DEL MAR MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES

EDUARDO ZARZA MOYA
Plataforma Solar de Almería-CIEMAT

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y los cambios climatológicos que han experimentado algunas zonas del Planeta, han producido un desequilibrio entre la demanda y el suministro de agua de calidad, no sólo para abastecer a la población, sino también para la agricultura y la industria. Se estima que aproximadamente 2000 millones de personas carecen de una fuente segura de abastecimiento de agua potable en la actualidad.

No obstante, esta escasez de agua potable se da en muchas zonas que poseen abundantes recursos de agua salobre, bien procedente del mar o bien procedente de pozos subterráneos, que se han ido salinizando con el paso de los años. El Sur de España y muchos países ribereños del Mediterráneo constituyen buenos ejemplos de este tipo de zonas, donde la desalinización del agua del mar resolvería el problema de la escasez de agua de calidad, favoreciendo su desarrollo y expansión industrial. Estos son los motivos por los que el mercado de las plantas desalinizadoras ha crecido tanto durante las últimas décadas.

Actualmente, hay un gran número de plantas desalinizadoras instaladas por todo el mundo. La Figura 1 muestra cual ha sido la evolución de este mercado, que alcanzó en 1.990 una producción diaria del orden de los 13 millones de m³ de agua desalinizada. Esta gran expansión ha continuado durante los tres últimos años, y se espera que siga aumentando durante los próximos años.

Los cambios climáticos que se han experimentado durante los últimos años, han hecho que la opinión pública se sensibilice más sobre el tema de la escasez de agua, interesándose por la desalinización del agua del mar. Pero hay que decir que la desalinización del agua del mar no es un fruto de la tecnología moderna, ya que sus orígenes se remontan al siglo V antes de Jesucristo. Lo que si es cierto, es que esta tecnología ha ido perfeccionándose a lo largo de los siglos, experimentado un gran auge durante las últimas décadas del siglo XX.

Muchos filósofos griegos de la antigüedad (Tales de Mileto, Aritóteles, etc.) hablaban en algunos de sus escritos sobre la posibilidad de convertir el agua del mar en agua dulce, llegando incluso a describir dispositivos para destilar agua, pero sólo desde un punto de vista teórico. Los escritos y tratados en los que se habla de la destilación del agua del mar desde un punto

de vista práctico, son un poco posterior. San Basilio, Arzobispo de Cesarea, informa en sus «Homilías» del procedimiento seguido por algunos marineros para destilar el agua del mar. Este procedimiento consistía en colocar agua salada dentro de unos calderos que se ponían sobre un potente fuego; encima del caldero colocaban unas esponjas que absorbían el vapor desprendido del caldero al hervir el agua de mar, al exprimir las esponjas los marineros obtenían agua dulce para beber.

Existen escritos que datan del siglo III después de Jesucristo y que describen aparatos para destilar agua mediante la condensación del vapor, son los llamados alambiques. Posteriormente, durante la Edad Media, muchos alquimistas árabes y persas practicaban la desalinización del agua de mar.

En los albores del Renacimiento, algunos alquimistas árabes desalinizaban el agua del mar haciendo uso de la energía solar; para ello utilizaban vasijas de vidrio dentro de las cuales ponían el agua de mar, calentándola mediante espejos que reflejaban la radiación solar sobre las vasijas, aportando de este modo el calor necesario para la evaporación del agua.

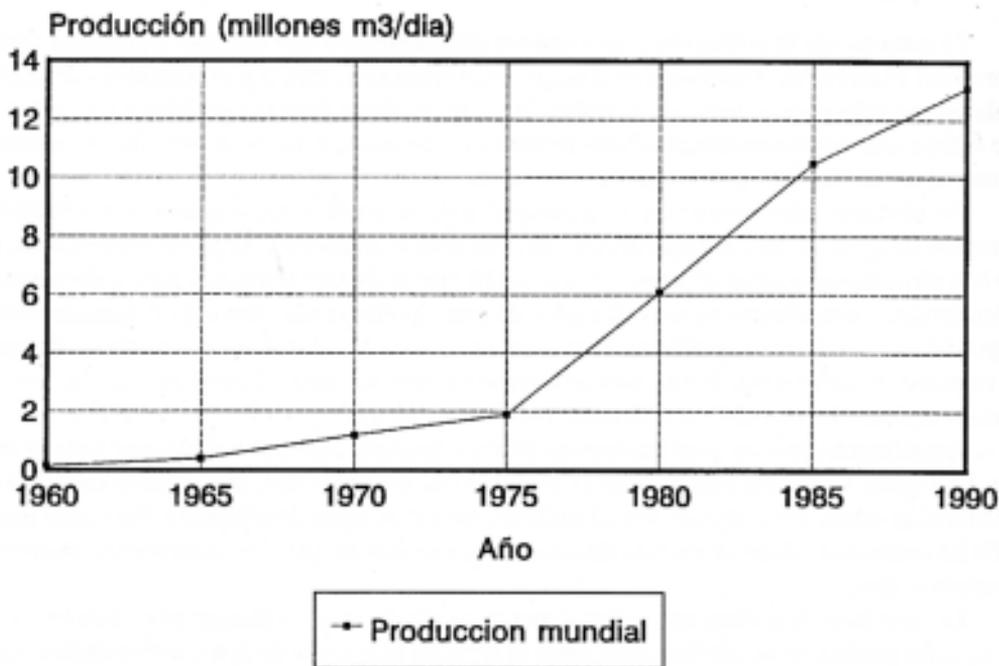


Figura 1. Evolución de la producción mundial de agua desalinizada

Tras el descubrimiento de América, el inicio de largos viajes por el mar ayudó a perfeccionar un poco más el proceso de destilación del agua de mar, ya que resultaba más rentable transportar un destilador de agua y el combustible necesario (madera), que transportar grandes cantidades de agua para beber.

En 1675 se registró la primera patente sobre desalinización. En 1872 el ingeniero sueco Carlos Wilson construyó la primera planta desalinizadora de tamaño industrial. Se trataba de un Solar Still de 4.757 m², con una producción diaria de 22.5 m³/día. Esta planta fue construida en Chile.

En los comienzos del siglo XX se construyeron algunas pequeñas plantas desalinizadoras portátiles, especialmente diseñadas para ser utilizadas en la guerra y asegurar el abastecimiento de agua a los soldados.

Queda claramente demostrado por lo descrito en los párrafos anteriores, que la desalinización del agua de mar no es una técnica reciente, aunque el gran avance experimentado durante el siglo XX en este campo haya impulsado una mejora de los procesos y una mayor diversidad de opciones.

ATRACTIVO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR

Existen diversos factores que hacen de la desalinización de agua del mar una aplicación atractiva para las energías renovables. Por un lado, está el hecho de que muchas zonas con escasez de agua desalinizada, poseen un buen potencial de alguna de dichas energías, especialmente de la Eólica o de la Solar. Así, existen muchas localizaciones en las que el viento es un factor climatológico frecuente, como es el caso de un elevado número de islas mediterráneas, a la vez que existe una apreciable escasez de agua potable, lo que obliga a realizar su suministro mediante buques cisternas. El coste de este agua suele estar entre 800 y 1.000 Ptas/m³.

También existen muchas regiones en las que la escasez de agua potable va acompañada de un buen nivel de insolación (exposición a la Radiación Solar). Almería es un claro ejemplo de este tipo de zonas.

Además de los factores medio ambientales ya mencionados, existen otros factores que aumentan el atractivo del uso de las energías renovables para la desalinización de agua de mar. Uno de estos factores es la simultaneidad estacional entre la demanda de agua potable y la disponibilidad de dichas energías. En numerosas localidades costeras y centros turísticos, la demanda de agua potable crece espectacularmente en verano, motivado por el gran aumento que experimenta la población debido al turismo. Y es precisamente en verano cuando la disponibilidad de la radiación solar es máxima.

Todos estos factores han motivado que numerosas instituciones y organismos oficiales hayan desarrollado, o estén desarrollando, proyectos destinados a mejorar y hacer más competitivos los sistemas de desalinización de agua de mar que funcionan con alguna de aquellas energías renovables, que presentan unas características adecuadas para este tipo de proceso.

Antes de exponer los diferentes sistemas de desalinización que funcionan con energías renovables, será útil hacer un breve repaso de los principales procesos existentes. De este modo, resultará más fácil comprender la configuración y principio de funcionamiento de los sistemas desalinizadores, que hacen uso de las energías renovables como medio de abastecimiento energético.

PROCESOS DE DESALINIZACIÓN EXISTENTES

Existen diversos criterios para clasificar los diferentes procesos de desalinización que existen actualmente. Una modo útil y claro de clasificarlos es dividirlos en dos grupos:

- 1) aquellos procesos que realizan un cambio de fase para obtener el agua pura.
- 2) aquellos procesos que funcionan sin cambio de fase.

Entre los procesos que implican un cambio de fases están los siguientes:

- a) Destilación en Múltiple Efecto
- b) Flashing en Múltiple Efecto
- c) Congelación
- d) Compresión de vapor
- e) Destilación Solar

Los procesos que no realizan un cambio de fases incluyen:

- f) Ósmosis Inversa
- g) Electrodiálisis

Podría hacerse la misma clasificación anterior si en vez de tomar como criterio diferenciador el cambio o no de fase, se adoptase el criterio de clasificar los procesos de desalinización de acuerdo con el tipo de energía que consumen: Energía Térmica (grupo 1) o Energía mecánica (grupo 2). La única objeción que podría hacerse es el hecho de que la Compresión de Vapor admite las dos posibilidades, y podría estar en cualquiera de los dos grupos, dependiendo de la variante de proceso elegida, como se verá mas adelante.

El consumo energético de los procesos que usan energía térmica se da mediante un parámetro llamado «**Factor de Rendimiento (FR)**», que nos da la cantidad de agua pura producida (en Kg) por cada 2.300 kJ de energía térmica consumida por el proceso. Recuérdese que esta cantidad de energía corresponde a la requerida para evaporar un Kg de agua en condiciones normales de presión y temperatura. Por lo tanto, puede decirse que el proceso será tanto más eficiente cuanto mayor sea su FR.

Para los procesos que requieren energía mecánica, el consumo energético se da en términos del número de kWh_e consumidos por cada Kg de agua producida. Por lo tanto, el proceso será tanto más eficiente cuanto menor sea su consumo específico (kWh/m³ de agua producida).

DESTILACIÓN Y FLASHING EN MÚLTIPLE EFECTO

Para obtener agua destilada, es necesario producir vapor primero y condensarlo después. La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de una planta de destilación simple (con un solo efecto). Los dos elementos básicos de esta planta son : el evaporador y el condensador.

El evaporador es el elemento en el cual se produce el aporte energético al proceso, en forma de energía térmica.

Como consecuencia del aporte térmico que se realiza en el evaporador, una parte del agua que se encuentra en él se evapora y pasa al condensador. Una vez en el condensador, este vapor se condensa gracias al agua de refrigeración que circula por su interior. En el caso de la figura 2, el propio agua de alimentación se utiliza como elemento refrigerante, ya que se encuentra a temperatura ambiente. De este modo se disminuye la cantidad de calor que hay que aportar en el evaporador, debido a que el agua se precalienta antes de entrar en él.

El valor del FR para un sistema como el descrito es próximo a 1. Para obtener valores más elevados del FR se utilizan plantas de Destilación en Múltiple Efecto, siendo el FR mayor cuanto mayor es el número de efectos, debido a evaporaciones consecutivas con temperaturas decrecientes, recuperando el calor latente de evaporación. Veamos ahora en que consiste una Planta de Destilación en Múltiple Efecto, conocidas internacionalmente con las siglas MED (Multi Effect Distillation). La Figura 3 corresponde a una planta de este tipo. A los efectos se les llama también etapas o celdas. Cada etapa puede compararse a un planta de un efecto en la que el aporte de energía térmica lo realiza el vapor producido en la etapa anterior al condensar.

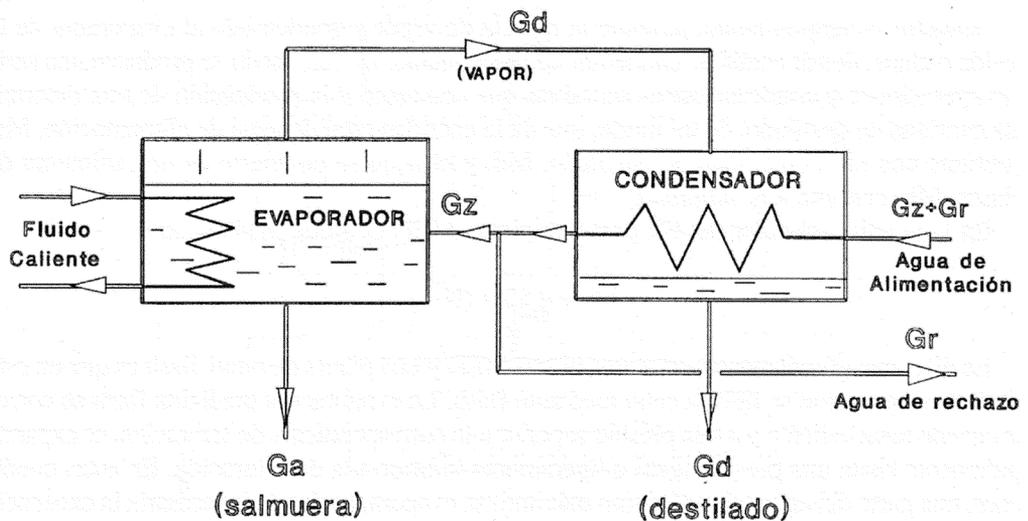


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un destilador de un solo efecto

El funcionamiento de una planta MED es el siguiente(ver fig.3). El agua de mar que se pretende desalinizar se hace pasar, en una determinada cantidad, por el condensador de la planta, con el fin de condensar el vapor que se ha producido en el último efecto. Tras atravesar el condensador, una parte del agua de alimentación se rechaza, utilizándose sólo una fracción de ella como agua de alimentación para el proceso.

Este agua de alimentación se hace pasar por una serie de precalentadores (P1, P2, ... P14), con el objeto de aumentar su temperatura hasta aproximarla a la de evaporación existente en la 1ª etapa o efecto. Existe un precalentador en cada etapa. Tras pasar por el último precalentador, el agua de alimentación es introducida en la 1ª etapa, pulverizándose sobre un intercambiador de calor de haz tubular. Por el interior de los tubos de este intercambiador circula el fluido caliente que aporta la energía térmica que requiere el proceso(normalmente vapor).

Como consecuencia de la pulverización del agua de alimentación sobre el evaporador de la 1ª etapa, se evapora una fracción de la misma. Este vapor pasa a la zona de la 1ª celda donde se encuentra el precalentador correspondiente; al entrar en contacto con la superficie externa del precalentador, el vapor condensa parcialmente y pasa a la 2ª etapa.

El resto del agua de alimentación que no se evaporó en la 1ª etapa pasa a la 2ª, donde se evaporará otra fracción de la misma, gracias al calor que le cede la mezcla de condensado y vapor que proviene de la 1ª etapa. Esta evaporación se produce a una temperatura algo inferior a la de la 1ª etapa, ya que la presión existente en las sucesivas celdas es diferente y decreciente desde la primera hasta la última celda.

El vapor producido en la 2ª etapa se condensa parcialmente sobre la superficie externa del precalentador correspondiente, pasando la mezcla de vapor y condensado al evaporador de la 3ª celda o etapa, donde acaba de condensar completamente. De este modo se producen una serie de evaporaciones y condensaciones sucesivas que conducen a la producción de una determinada cantidad de destilado, de tal modo, que de la cantidad total de agua de alimentación, M_a , se obtiene una cierta cantidad de destilado, M_d , y el resto se convierte en una salmuera de rechazo, M_b , con una alta salinidad.

En la práctica, el valor del FR para una planta MED es aproximadamente:

$$FR = 0.85 \times (N-1)$$

La diferencia fundamental entre una planta MED y una planta de multi-flash es que en esta última la evaporación se lleva a cabo mediante flash. La evaporación mediante flash se consigue cuando agua caliente y a una presión superior a la correspondiente de saturación, se expande rápidamente hasta una presión igual o ligeramente inferior a la de saturación. En estas condiciones, una parte del agua (el 10% como máximo) se evapora, haciendo innecesaria la existencia de un intercambiador de calor que actúe como evaporador.

CONGELACIÓN

Este tipo de proceso podría describirse como el proceso mediante el cual el agua de mar es llevada a un estado termodinámico en el cual el componente con el punto de congelación

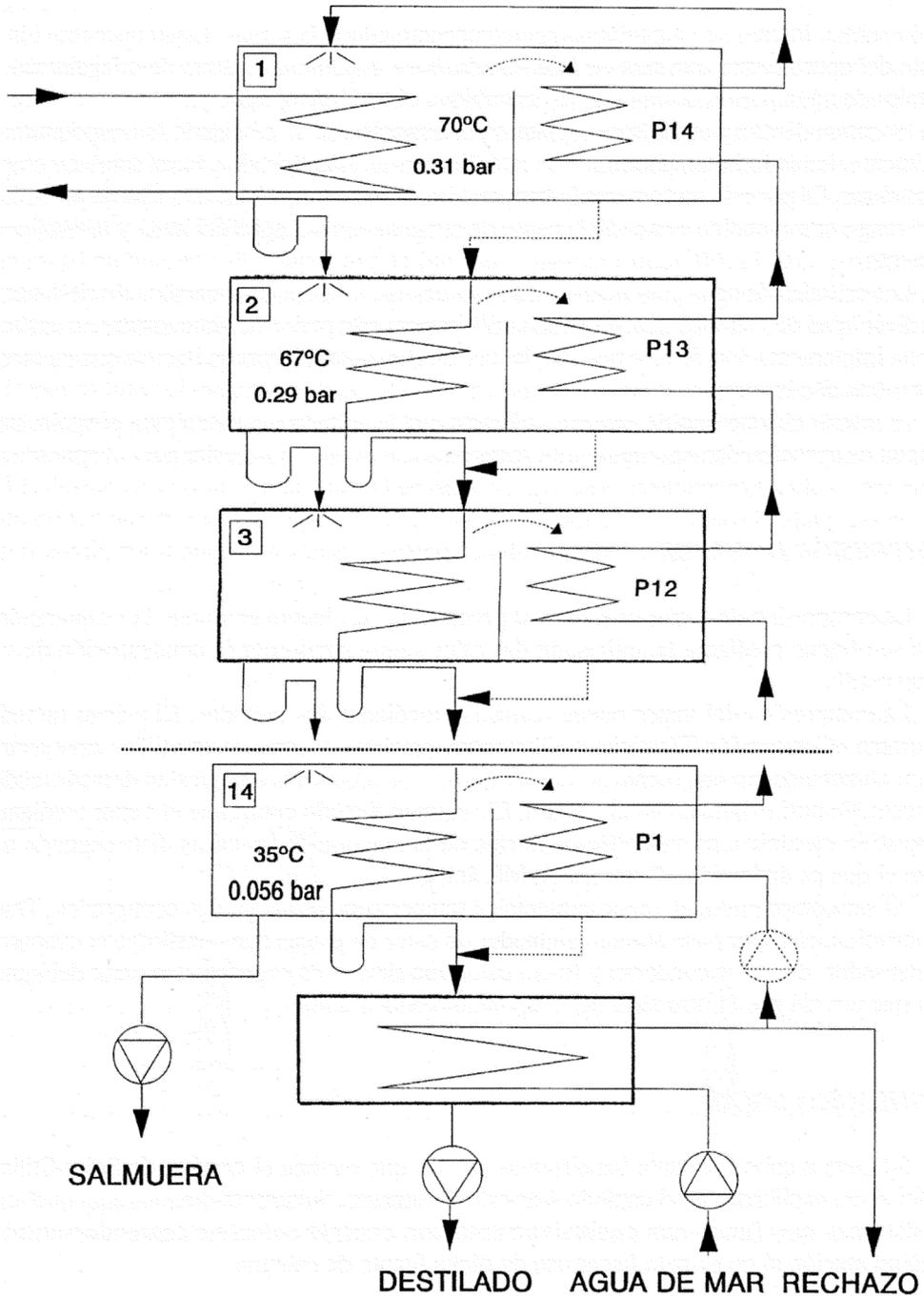


Figura 3. Esquema de funcionamiento de una Planta de Destilación en Múltiple Efecto

más alto (el agua) se separa espontáneamente, mediante cristalización, dentro de la misma solución salina, la cual se va paulatinamente concentrando más y más. Esta concentración creciente del agua de mar que está en fase líquida, hace disminuir su punto de congelación. Los cristales de agua pura son «lavados» y extraídos, obteniéndose agua pura.

El componente agua se separa primero por congelación al ir bajando la temperatura. Naturalmente, bajando la temperatura mas allá de un determinado valor, la sal también empieza a cristalizar. Es por este motivo que la temperatura de trabajo típica de este tipo de proceso está en el rango comprendido entre -5°C (punto de congelación del agua del mar) y la temperatura ambiente.

Los cristales de agua pura pueden ser extraídos mediante centrifugación. No obstante, hay una diversidad de métodos que se pueden utilizar para este proceso. Actualmente no existe una amplia implementación de este tipo de plantas desalinizadoras y puede decirse que su tecnología no esta aún madura.

El interés de este tipo de proceso radica en que la energía requerida para congelar un Kg de agua es aproximadamente igual a la sexta parte de la que se necesita para evaporarla.

COMPRESIÓN DE VAPOR

La compresión de vapor se refiere al proceso de destilación en el que la evaporación del agua se obtiene mediante la aplicación del calor suministrado por la condensación de vapor comprimido.

La compresión del vapor puede realizarse mediante dos métodos. El primer método se denomina «Compresión Térmica» o «Termocompresión», y consiste en utilizar un eyector de vapor, alimentado por una fuente de vapor externa, que produce la compresión deseada mediante el efecto Venturi originado en el eyector. El segundo método comprime el vapor mediante un dispositivo mecánico, movido eléctricamente en la mayoría de los casos. Este segundo método es el que se denomina «Compresión Mecánica».

Al ser comprimido, el vapor aumenta su temperatura varios grados centígrados. Tras ser comprimido, el vapor pasa al intercambiador de calor de placas que constituye el evaporador/condensador, donde se condensa y libera calor que sirve para evaporar una parte del agua salada que circula por el otro lado del evaporador/condensador.

DESTILACIÓN SOLAR

Se lleva a cabo mediante los sistemas solares que reciben el nombre de Solar-Stills, los cuales serán explicados en el capítulo 4 de este documento. Solamente diremos aquí que se trata de sistemas que funcionan exclusivamente con energía solar, no teniendo sentido su implementación si no es para hacer uso de dicha fuente de energía.

ÓSMOSIS INVERSA

Los módulos o membranas de Ósmosis Inversa son el verdadero corazón de una planta de este tipo. La Figura 4 muestra gráficamente el principio de la ósmosis inversa. Si en el interior de un recipiente se separan mediante una membrana semi-permeable, una solución salina y agua dulce, se verá que una parte del agua dulce pasará a la solución salina, elevando el nivel de esta (fig. 4a). La presión estática «Po» correspondiente a esta diferencia de nivel es lo que se denomina «PRESIÓN OSMÓTICA» de esa solución salina. Si se aplica sobre la superficie de la solución salina una presión mayor que la presión osmótica (figura 4b), el agua pasará de la solución salina a la dulce, a través de la membrana semi-permeable, produciendo un incremento del volumen del agua dulce. A este proceso se le denomina Ósmosis Inversa, y es el principio de funcionamiento de los módulos de ósmosis.

Dependiendo del tamaño de la planta y de las características físicas y biológicas del agua a desalinizar, la instalación de una planta de Ósmosis Inversa será simple o más o menos compleja, ya que de ello dependerá los equipos auxiliares de tratamiento que se necesitan.

El consumo energético en una planta de ósmosis inversa es netamente eléctrico, correspondiendo principalmente a la energía eléctrica consumida por motobombas de alta presión. Los equipos auxiliares suponen un consumo eléctrico adicional pequeño.

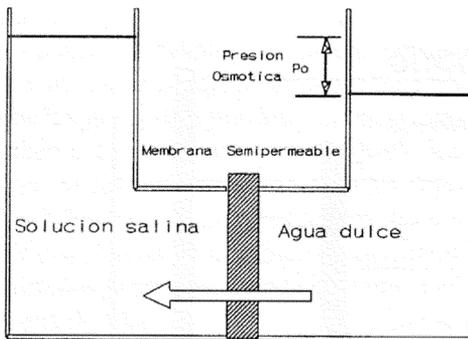


Figura 4a. Presión Osmótica

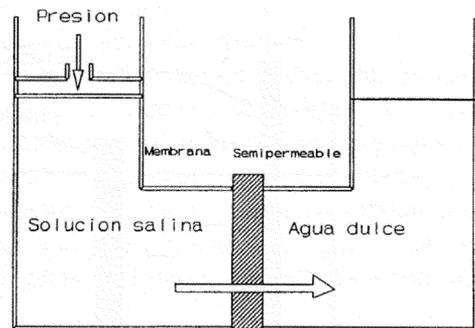


Figura 4b. Ósmosis Inversa

ELECTRODIÁLISIS

La Electrodiálisis es otro de los procesos que, como la Ósmosis Inversa, desalinizan el agua del mar sin que se produzca un cambio de fase. Este tipo de plantas se basan en el hecho de que si se hace circular por una solución iónica una corriente continua, los iones cargados positivamente (cationes) se desplazan en dirección al electrodo negativo o Cátodo. Del mismo modo, los iones cargados negativamente (aniones) se desplazan hacia el electrodo positivo o Ánodo.

Por lo tanto, si entre el Ánodo y el Cátodo colocamos un par de membranas semipermeables, una de las cuales es permeable a los cationes y la otra lo es a los aniones, se ira paulatinamente formando una zona de baja salinidad entre las dos membranas. Este es el proceso conocido como «electrodiálisis», fundamento de las plantas desalinizadoras que llevan este nombre.

La Figura 5 muestra gráficamente este fenómeno. Aunque el proceso de la electrodiálisis es conocido desde comienzos del presente siglo, las membranas primitivas solo eran parcialmente selectivas. Fue a partir de 1.940 cuando la fabricación de nuevas membranas permitió la implantación comercial de este tipo de plantas para desalinizar aguas de baja salinidad.

Al igual que las plantas de Ósmosis Inversa, las plantas de Electrodiálisis requieren un cuidadoso pretratamiento del agua de entrada, a fin de no dañar irreversiblemente las membranas.

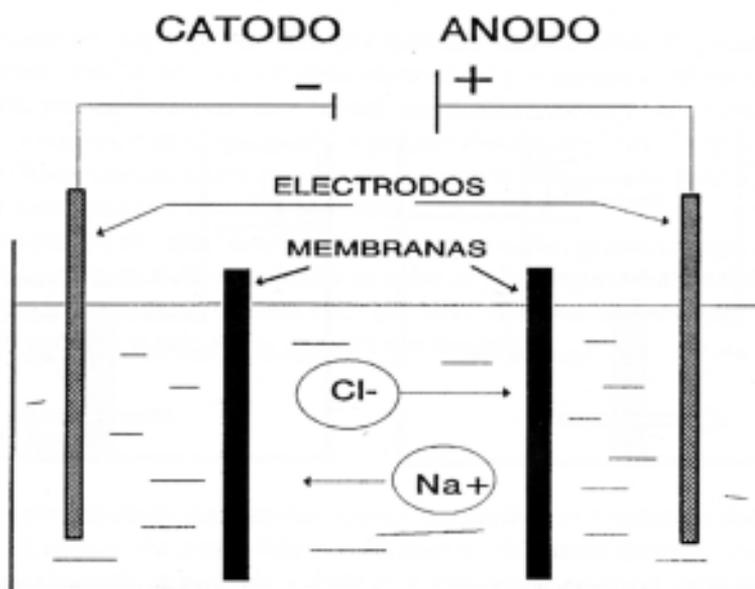


Figura 5. Proceso de la Electrodiálisis

SOLAR STILLS

Los Solar Stills son unos sistemas de desalinización mediante evaporación que operan con la energía disponible en la radiación solar.

Son sistemas especialmente diseñados para aprovechar de un modo pasivo la energía solar, haciendo uso del conocido «efecto invernadero». Los elementos básicos que componen un solar still son dos:

- La piscina o estanque
- La cubierta

La piscina o estanque es, como su nombre indica, el lugar donde se encuentra almacenada el agua salada que se pretende desalinizar. Puede aprovecharse una hondonada o cavidad natural en el terreno, o bien construirse de obra civil al igual que una piscina o estanque artificial.

La cubierta consta de una superficie transparente (a base de plástico o vidrio) colocada encima del estanque, de modo que en su interior se consiguen temperaturas lo suficientemente elevadas como para producir la evaporación de una determinada cantidad de agua del estanque. Esta temperatura interior elevada (>60 °C) se consigue gracias al «Efecto Invernadero» producido por la cubierta transparente, que consiste en que la mayor parte de la radiación solar exterior consigue atravesar la superficie de la cubierta, que actúa como una trampa térmica para la radiación solar. Esta radiación solar que atraviesa la cubierta transparente es absorbida en parte por el agua que existe en el interior, y la otra parte es emitida con una longitud de onda mayor que la de la radiación incidente. Debido a su mayor longitud de onda, esta radiación es en su mayoría incapaz de atravesar hacia el exterior la cubierta transparente, quedando atrapada en el interior del solar still, produciendo el consiguiente aumento de la temperatura ambiente, lo que favorece la evaporación de una pequeña fracción del agua allí existente.

Este vapor condensa al entrar en contacto con la cara interior de la cubierta, formando pequeñas gotas de agua destilada que terminan uniéndose entre sí y se deslizan siguiendo la pendiente de la cubierta, para finalizar siendo recogidas y canalizadas por los oportunos conductos colectores que terminan en los depósitos de almacenamiento de agua destilada.

La Figura 6 muestra diferentes diseños de un Solar Still, en los que se ha variado la forma y disposición de la cubierta transparente. Como puede observarse en la figura 6, en todos los diseños la pendiente de la cubierta conduce las gotas del agua condensada a los colectores de agua destilada.

Los Solar Still no se usan para producir grandes cantidades de agua desalinizada debido a que estos sistemas presentan una baja producción de destilado por unidad de superficie, lo que obligaría a disponer de una superficie de terreno excesivamente grande. La producción diaria de un Solar Still suele estar comprendida entre 1 y 4 litros de agua por cada m² de superficie del estanque. Este tipo de sistema de desalinización tiene otro inconveniente adicional, que consiste en las inevitables pérdidas de vapor y de destilado, siendo necesaria una considerable labor de mantenimiento para que estén completamente operativos. También experimentan un

acusado descenso de productividad con el tiempo debido a diversos factores(envejecimiento y ensuciamiento de la cubierta, etc.).

Otro de los inconvenientes que posee un Solar Still es el coste relativamente alto que presentan, sobre todo si se instalan en países industrializados donde el coste de la mano de obra es alto. El coste de los materiales necesarios es relativamente bajo, pero requieren bastante mano de obra para el montaje y la instalación.

A pesar de estos inconvenientes, los Solar Still son atractivos para pequeñas instalaciones, especialmente en localizaciones remotas con escasos recursos energéticos y un buen nivel de radiación solar. Este es el motivo por el cual este tipo de sistemas ha sido y es objeto de estudio en países como Pakistán, India y Grecia. Todos estos países poseen numerosas instalaciones de este tipo.

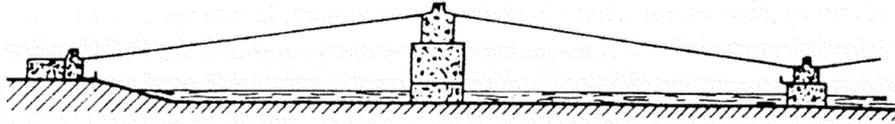
El Factor de Rendimiento típico de un Solar Still es del orden de 0.53, lo que significa que se necesitan 4,350 kJ para producir 1 kG de agua destilada.

Las experiencias prácticas existentes con los Solar Still muestran que el elemento más frágil y que suele ocasionar la puesta en fuera de servicio de la instalación, es la cubierta . Este problema se hace tanto más patente cuanto mayor es la superficie del sistema, ya que cuanto mayor es la superficie de la cubierta, más propensa es a los agentes meteorológicos(viento, granizo, etc..). Este es el principal motivo por el que estos sistemas resultan más adecuados para pequeños sistemas, siendo utilizado en la actualidad para pequeños núcleos rurales de países mediterráneos y asiáticos.

Los requisitos básicos de un buen solar still son que el sistema:

- Sea fácilmente montado en el campo
- Esté construido con materiales que estén disponibles en/o cerca del lugar donde se pretende instalar, de modo que los costes de transporte sean pequeños.
- Sea ligero, pudiéndose manejar e instalar con facilidad
- Tener una vida útil de 10 a 20 años, con una labor de mantenimiento normal
- No requerir fuente energética externa
- Poder servir, a la vez, de superficie captadora del agua de lluvia
- Resistir vientos de intensidad moderada
- Estar fabricados con materiales que no contaminen el agua de lluvia que recogen ni el destilado que producen

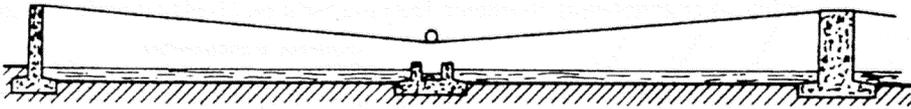
Existen diseños avanzados de Solar Still en los que se ha tratado de aumentar el rendimiento, incorporando para ello un segundo efecto en el interior de la cubierta. Este segundo efecto consiste en que el vapor de agua que se desprende de la superficie del estanque, no condensa sobre la cara interior de la cubierta del solar still, sino que lo hace sobre otra superficie intermedia que sirve como fondo de un recipiente que contiene también agua salobre. De este modo, el vapor que se desprende de la superficie del estanque se condensa cediendo su calor latente de evaporación al agua salobre contenida en el recipiente intermedio, calentándola. El resultado obtenido con esta mejora es un Factor de Rendimiento mayor(del orden de la unidad), pero también se complica la construcción del sistema y se aumentan las labores de mantenimiento.



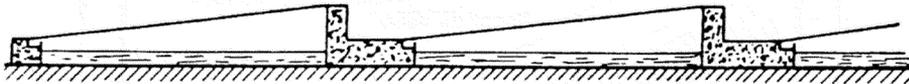
Diseño Básico



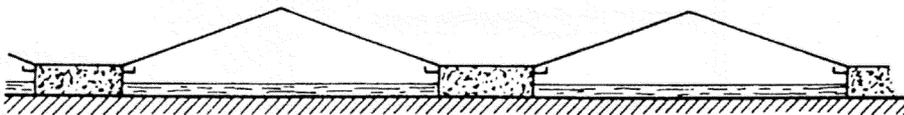
Solar Still de cubierta inflada



Solar Still de cubierta plástica tensionada



Cubierta de vidrio inclinada



Solar Still tipo invernadero

Figura 6. Diferentes diseños de Solar Still

COLECTORES DESALINIZADORES COMPACTOS (C.D.C.)

A estos colectores solares se les podría definir como pequeños Solar Stills, ya que su principio de funcionamiento es idéntico. La única diferencia apreciable es el tamaño, que resulta sensiblemente inferior en el caso de los C.D.C.

La Figura 7 muestra un C.D.C. típico, en el que pueden apreciarse los mismos elementos que hemos descrito para los Solar Still: Cubierta transparente, depósito para el agua salobre, canales de recogida para el destilado, etc.

Estos sistemas son de pequeño tamaño, lo que permite su instalación en las azoteas de las viviendas. Esta es su principal ventaja, ya que los convierte en sistemas desalinizadores al alcance de cualquier persona que desee disponer de una pequeña cantidad de agua desalinizada.

Existen otros diseños de C.D.C., como los mostrados en las Figuras 8, 9 y 10. La figura 8 muestra un C.D.C. en el que el recipiente para albergar el agua de mar ha sido sustituido por una mecha que permanece constantemente húmeda gracias a un flujo continuo de agua salada que circula, por gravedad, desde la parte superior hasta la salida situada en la parte inferior del colector.

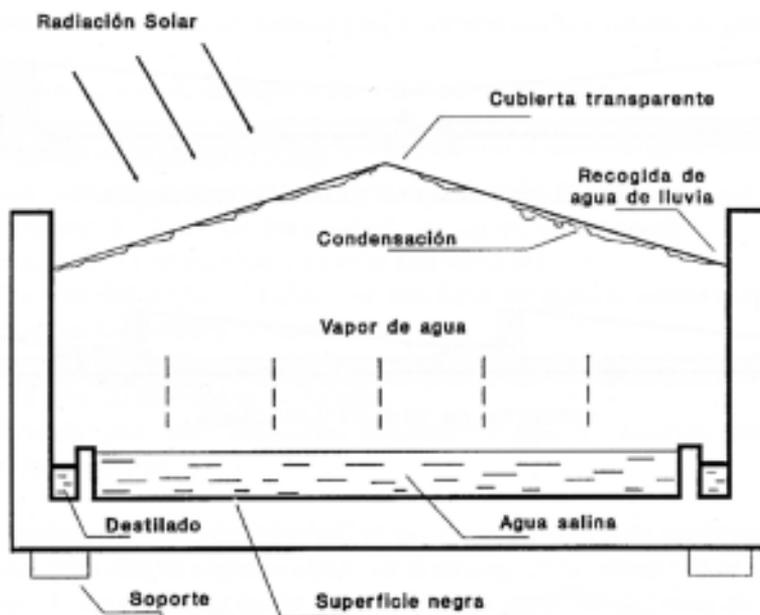


Figura 7. Ejemplo de Colector Desalinizador Compacto(C.D.C.) típico

La figura 9 es un C.D.C multi-etapa, en el cual se consigue aumentar su rendimiento. En él también se han sustituido en el absorbedor los recipientes para el agua de mar por mechas

permanentemente impregnadas de agua del mar que proviene de un depósito central. Aunque este diseño permite aumentar el rendimiento, también es cierto que su coste es mayor.

La figura 10 muestra un diseño denominado «tipo escalera», con el que se persigue aumentar el rendimiento a base de aumentar la energía solar disponible y disminuir las pérdidas térmicas. Esto se consigue al inclinar la superficie transparente de modo que el ángulo de incidencia de los rayos solares está próximo a los 90° , a la vez que se aumenta la superficie libre disponible del agua de mar en el interior. El pequeño volumen de aire existente entre la cubierta transparente y la superficie del agua salada hace que las pérdidas térmicas sean también menores.

La tendencia en el diseño de los C.D.C. es realizar los procesos de evaporación y condensación en zonas diferentes, de modo que el vapor que se produce no condense sobre la cubierta transparente a través de la cual penetra la radiación solar al interior del colector. De este modo se logra aumentar la eficiencia, por un doble motivo: al evitarse la formación de gotas de condensado sobre la cara interior de la cubierta transparente, se aumenta su transparencia a la radiación solar incidente, a la vez que se disminuyen las pérdidas térmicas del sistema. Una forma de llevar esto a cabo es condensar el vapor en una cámara diferente de donde se realiza la absorción de la radiación solar.

El colector mostrado en la figura 11 es un ejemplo de este tipo de diseño avanzado, en el que, además de separar físicamente las zonas donde se producen la evaporación y la condensación, se utiliza un fluido auxiliar como elemento de transferencia de calor.

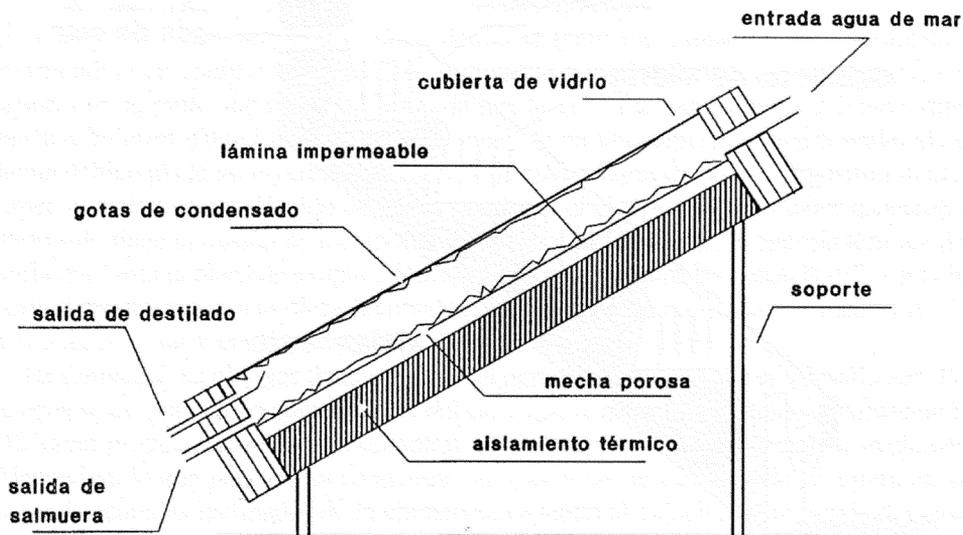


Figura 8. C.D.C. con mecha porosa como absorbente

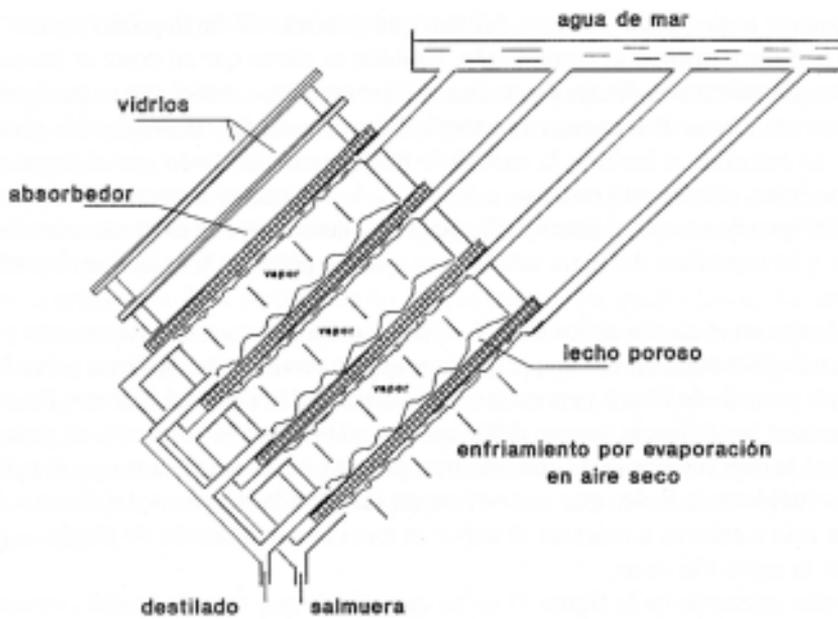


Figura 9. C.D.C. tipo multiefecto

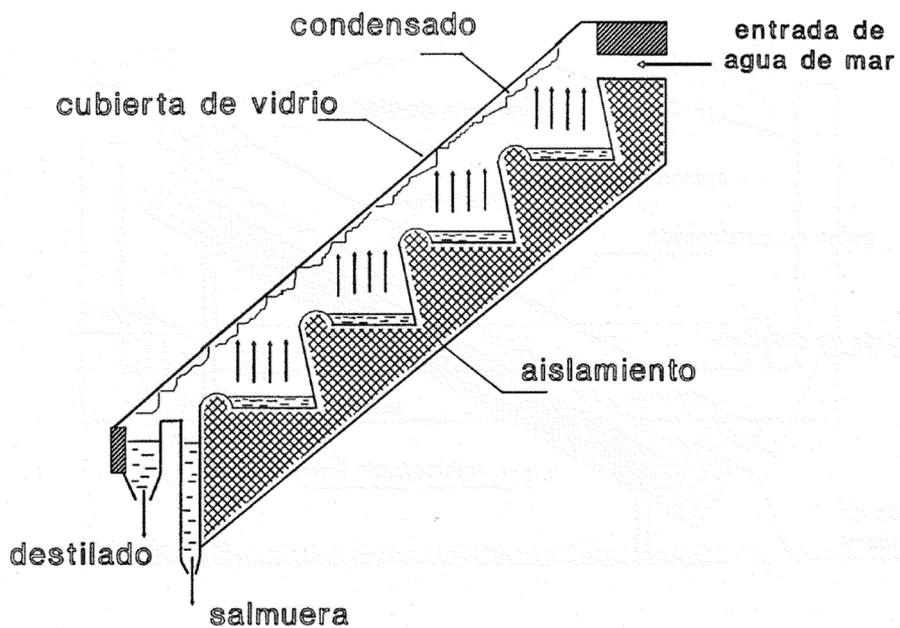


Figura 10. Diseño de un C.D.C. tipo escalera

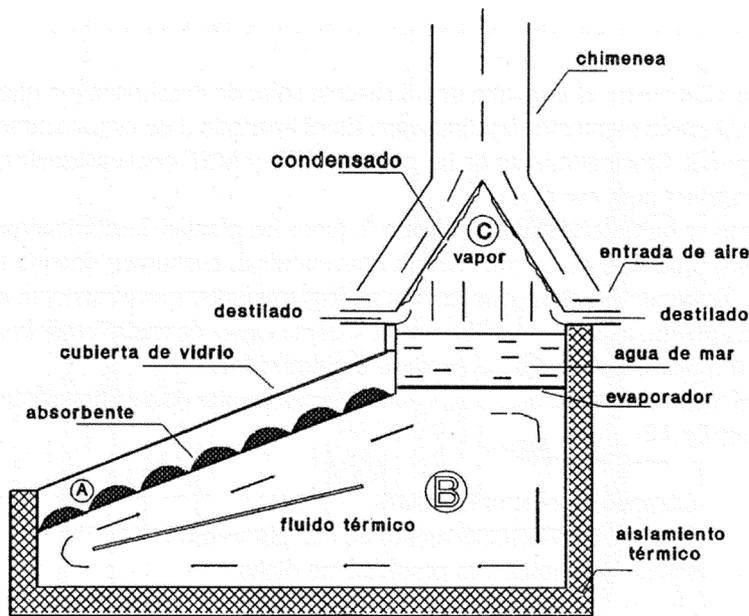


Figura 11. Ejemplo de un diseño de C.D.C. con condensador separado

En el colector mostrado en la Figura 11 se distinguen tres zonas claramente diferenciadas: «A», «B» y «C». La zona A es el lugar donde se realiza la captación de la radiación solar, convirtiéndola en energía térmica. Está compuesta por una cámara estanca con vacío en su interior, por su parte superior está limitada por la cubierta transparente, mientras que en la superficie inferior está el absorbente, que consiste en una superficie negra ondulada que se calienta debido al efecto invernadero. La zona B está compuesta por un depósito estanco lleno de agua o cualquier otro líquido de buena conductividad térmica y alto calor específico. Este líquido solo tiene la misión de transportar, por convección natural, la energía térmica desde el absorbente hasta la placa de evaporación, que está situada entre las zonas B y C. En el interior de este depósito existe una placa inclinada para favorecer la recirculación natural del líquido por convección, tal y como muestran las flechas.

La Cámara C es el lugar donde se tiene el agua de mar que se desea desalinizar. Parte de este agua se evapora como consecuencia del calor que le transmite el fluido existente en la zona B. El vapor producido asciende hasta entrar en contacto con la cara interior de la chimenea de refrigeración, lo que provoca su condensación. Las gotas de condensado se aglutinan y deslizan por las paredes inclinadas de la chimenea, cayendo al colector de recogida del destilado. La circulación de aire por la chimenea puede hacerse tanto de un modo natural como recurriendo al uso de un pequeño ventilador.

SISTEMAS SOLARES DE DESALINIZACIÓN CON PLANTAS M.E.D. Y M.S.F.

La Figura 12 muestra el esquema de un sistema solar de desalinización que usa una planta del tipo MED como elemento desalinizador. En el apartado 3 de este documento se ha descrito el principio de funcionamiento de las plantas MED y MSF convencionales, por lo que no se volverá a exponer aquí ese tema.

Tal y como se ha descrito en el apartado 3, tanto las plantas desalinizadoras MED como las del tipo MSF que funcionan con energía convencional, consumen energía térmica fundamentalmente. Teniendo presente este hecho, es lógico pensar que el sistema solar que debe acoplarse a una planta de este tipo, debe ser un sistema capaz de transformar la radiación solar en la energía térmica que demanda el proceso desalinizador.

Los tres elementos básicos que componen un sistema solar de desalinización del tipo MED o MSF son (ver fig.12):

- Campo de colectores solares
- Sistema de almacenamiento de energía térmica
- Planta desalinizadora propiamente dicha

Veamos cual es la misión de cada uno de estos tres elementos.

Campo de colectores solares: los colectores solares son los encargados de transformar la radiación solar en energía térmica. Para ello se hace circular un fluido por los colectores, de modo que este fluido se calienta a medida que avanza a través de los mismos, siendo la energía solar transformada en energía térmica.

Existen diversos tipos de colectores solares que pueden utilizarse para este tipo de aplicación. Todos ellos deben de ser capaces de calentar el fluido a una temperatura de por lo menos 90°C. Aparte de la temperatura, otro factor que debe ser tenido en consideración a la hora de elegir el tipo de colector más adecuado, es el tipo de radiación solar que existe en el lugar donde se desea instalar el sistema de desalinización. En aquellos lugares donde la radiación solar directa es baja, se debe recurrir a colectores solares que no sean de concentración, ya que los colectores de concentración solo pueden aprovechar la radiación solar directa. En cambio, en aquellas zonas donde la insolación directa anual es del orden de 2 megawatios.hora/m², los colectores de concentración son generalmente la solución más efectiva.

Recordemos que la radiación solar tiene dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es aquella fracción de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra sin interactuar con las partículas que existen en la atmósfera. Por lo tanto, esta componente de la radiación solar llega a la tierra con una dirección bien definida, que viene dada por la línea que une el Sol con el punto en el cual nos encontramos. La radiación difusa corresponde a aquella fracción de la radiación solar global que ha interactuado con las partículas existentes en la atmósfera y ha modificado su trayectoria, llegando a la superficie terrestre sin una dirección bien definida. Este es el motivo por el cual la radiación predominante en los días nublados es la radiación difusa.

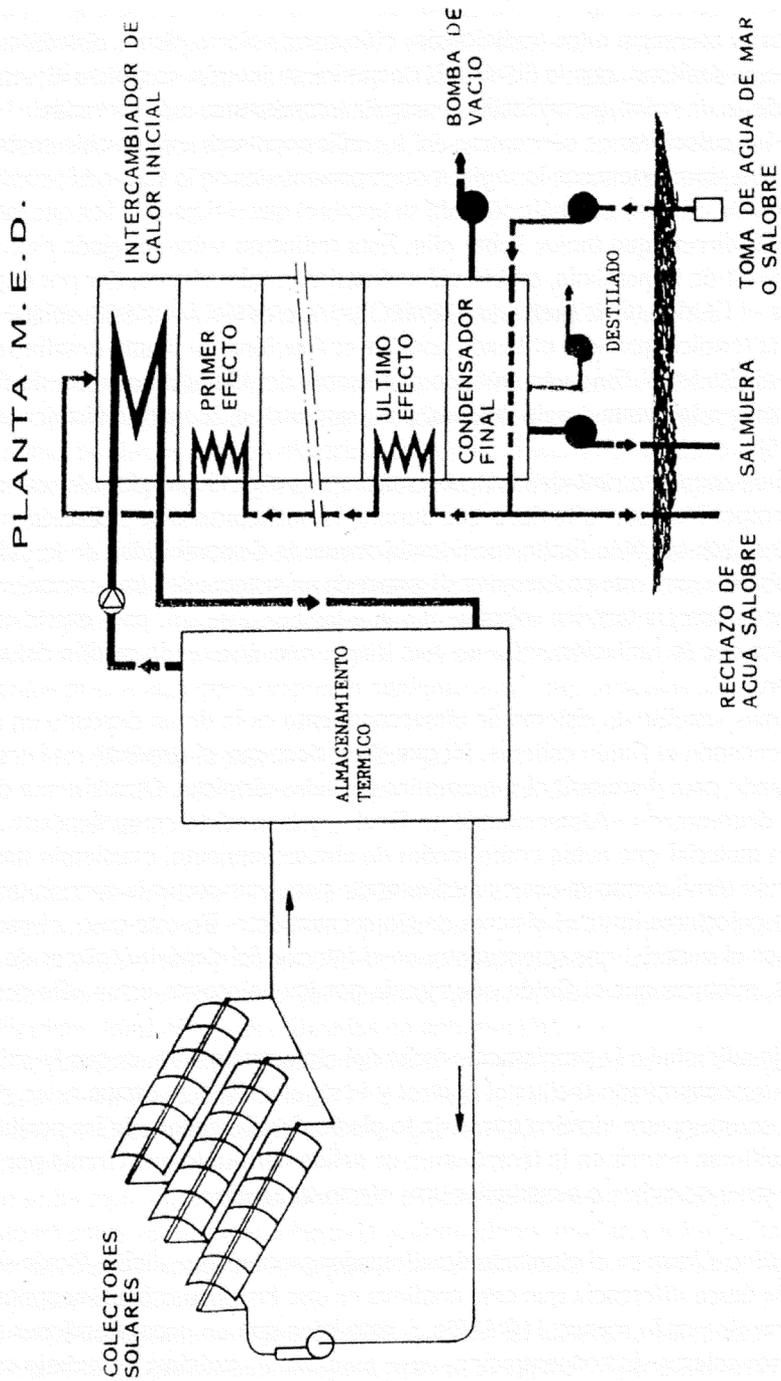


Figura 12. Esquema de un sistema solar MED típico

De entre los colectores sin concentración, los colectores de vacío son los más comunes. Estos colectores se asemejan a los tradicionales colectores solares planos utilizados para producir agua caliente sanitaria, con la diferencia de que en su interior se realiza el vacío a fin de reducir las pérdidas de calor, permitiendo conseguir temperaturas más elevadas.

Dentro de los colectores de concentración, los más populares son los colectores Cilindro-parabólicos. A este tipo pertenecen los colectores representados en la figura 12; constan de una superficie reflectante cilindro-parabólica (de ahí su nombre) que refleja, a la vez que la concentra, la radiación solar directa que incide sobre ella. Esta radiación solar reflejada es concentrada sobre el foco lineal de la parábola, en el cual se instala un tubo absorbedor por cuyo interior se hace circular el fluido que se pretende calentar. De este modo, la energía solar es transformada en energía térmica que será utilizada para hacer funcionar la planta desalinizadora.

Una vez calentado, el fluido es enviado al Sistema de Almacenamiento, de donde será enviado finalmente a la planta desalinizadora, para suministrar la energía térmica requerida.

Sistema de almacenamiento: una de las limitaciones que posee la energía solar es su discontinuidad en el tiempo. No hace falta decir que durante la noche no existe radiación solar, y que la existencia de nubes también limita considerablemente la disponibilidad de la radiación solar. La única solución para este problema es disponer de un sistema de almacenamiento que nos permita guardar la energía térmica sobrante durante las horas de sol, para usarla en aquellos momentos en los que la radiación solar no esté disponible. Esta es la misión del sistema de almacenamiento.

La forma más sencilla de sistema de almacenamiento es la de un depósito en cuyo interior se va almacenando el fluido caliente. Ni que decir tiene que el depósito está convenientemente calorifugado para disminuir al máximo las pérdidas térmicas. Otro sistema de almacenamiento es el denominado «Almacenamiento Dual», que consiste en un depósito relleno de un determinado material que actúa como medio de almacenamiento, existiendo una pequeña cantidad de fluido térmico que se usa exclusivamente para transportar la energía térmica desde el campo de colectores hasta el sistema de almacenamiento. En este caso, el medio de almacenamiento es el material que se encuentra en el interior del depósito (placas de hierro, de cerámica, etc..), mientras que el fluido que circula por los colectores actúa sólo como medio caloportador.

Una ventaja adicional a la propiamente dicha del almacenamiento, es que la existencia de un sistema de almacenamiento facilita el control y la regulación del sistema solar, puesto que actúa como un amortiguador térmico que aísla la planta desalinizadora de las posibles perturbaciones que pudieran ocurrir en la temperatura de salida del fluido que circula por los colectores debido al paso de nubes o a cualquier otro efecto transitorio.

La Planta Desalinizadora: es el elemento desalinizador propiamente dicho. Puede ser del tipo MED o MSF, la única diferencia que esto conlleva es que las plantas MSF necesitan trabajar con temperaturas de por lo menos 110-120°C, y esto hace que en pocas ocasiones se puedan utilizar colectores solares sin concentración, cuya temperatura máxima de trabajo está en torno a los 110°C. El funcionamiento de este tipo de plantas ya ha sido descrito en el capítulo 3 de este documento.

Como ejemplo de un sistema solar MED de desalinización, tenemos el instalado actualmente en la Plataforma Solar de Almería. En este sistema se ha integrado un campo de colectores solares cilindro-parabólicos y una planta MED de 14 etapas, habiéndose alcanzado un FR de 10.5. El sistema de almacenamiento utilizado consiste en un tanque vertical de 114 m³, lleno de aceite térmico del tipo Santotherm-55, que actúa simultáneamente como medio caloportador y medio de almacenamiento de la energía térmica suministrada por los colectores solares.

PLANTAS DESALINIZADORAS FOTOVOLTAICAS Y EÓLICAS

Los sistemas fotovoltaicos transforman la radiación solar en energía eléctrica, mientras que los sistemas eólicos transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica. Puesto que ambos sistemas producen energía eléctrica, cualquier proceso de desalinización que consuma principalmente este tipo de energía podrá utilizarse para desalinizar el agua mediante el uso de alguna de estas energías renovables.

De acuerdo con las características de los diferentes procesos de desalinización descritos en el capítulo 3 de este documento, tanto las plantas de Ósmosis Inversa como las de Electrodiálisis son adecuadas para ser acopladas a sistemas fotovoltaicos o eólicos. Dependiendo de cual sea el factor meteorológico predominante: el Sol o el viento, se instalará un tipo u otro de sistema. Los elementos principales que componen cualquiera de estos sistemas son (ver Figura 13):

- Sistema de generación eléctrica
- Sistema de almacenamiento de energía eléctrica
- Planta desalinizadora

Veamos una descripción básica de cada uno de estos elementos.

El sistema de generación eléctrica puede estar constituido por un conjunto de placas fotovoltaicas o por un aerogenerador. Las placas fotovoltaicas transforman la energía de los fotones de la radiación solar en energía eléctrica, que posteriormente es almacenada en acumuladores eléctricos similares a los utilizados en automoción.

Los aerogeneradores son generadores eléctricos que transforman la energía mecánica del viento en energía eléctrica. La fuerza del viento hace girar unas palas que van acopladas al eje del generador, produciendo energía eléctrica que también puede ser almacenada en acumuladores eléctricos.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de almacenamiento de energía eléctrica utilizado en estos sistemas es a base de acumuladores similares a los utilizados en aplicaciones convencionales, aunque con algunas características especiales para lograr una mayor fiabilidad y durabilidad.

La planta desalinizadora de este tipo de sistemas es idéntica a las plantas de Ósmosis Inversa convencionales, que ya han sido descritas en el capítulo 3, con los mismos elementos y componentes, por lo que no es necesario volver a describirlas aquí.

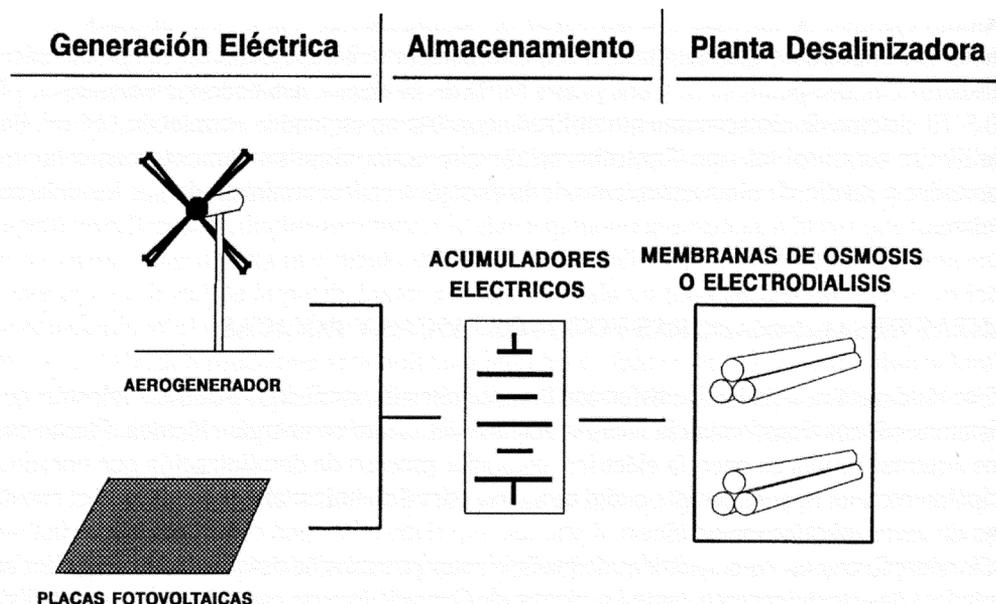


Figura 13. Sistema Solar y Eólico mediante Osmosis Inversa

En estos sistemas de desalinización existen una serie de subsistemas auxiliares eléctricos, como son:

-El inversor: sirve para transformar la corriente continua que proporcionan las baterías del sistema de almacenamiento, en la corriente alterna que requieren las motobombas y los elementos eléctricos que componen la planta desalinizadora.

-El rectificador: sirve para transformar la corriente alterna dada por el aerogenerador en corriente continua, y de este modo poder almacenarla en los acumuladores. Las plantas que funcionan con placas fotovoltaicas no necesitan rectificadores, ya que las placas solares proporcionan directamente energía eléctrica continua.

ANÁLISIS ECONÓMICO

En el campo comercial de los sistemas de desalinización, los resultados que se obtienen tras un análisis económico pueden ser muy diferentes. Dependiendo de los criterios adoptados y de las hipótesis de partida (período de vida útil del sistema, forma de amortizar el equipo, interés bancario, etc.), se pueden obtener unas cifras u otras. Puesto que realizar un análisis detallado de cada uno de los factores que deben ser considerados en este tipo de análisis y las diferentes formas en las que pueden ser contabilizados, requeriría un tiempo y una

profundización en la materia que caerían fuera del objetivo de este Seminario, en este capítulo sólo se van a exponer datos generales que permitirán tener una idea aproximada del coste y de la rentabilidad de este tipo de sistemas.

Se va a realizar una comparación entre los sistemas de Ósmosis Inversa y los de Destilación en Múltiple efecto. El coste específico del agua producida por un sistema de desalinización viene dado por la suma de tres costes parciales:

- Coste debido a la inversión inicial
- Coste de operación y mantenimiento
- Coste de la energía consumida por el proceso

El coste debido a la inversión es el asociado, como su nombre indica, a la inversión inicial que requiere la instalación. En él se engloban el coste de los equipos, el coste de la obra civil y el de las instalaciones auxiliares que son necesarias para el buen funcionamiento del sistema (toma de agua, filtros, planta de tratamiento, potabilizadora, etc.).

Los costes de operación y mantenimiento son los ocasionados por la explotación y la conservación de la planta. Entre los factores que hay que tener presentes a la hora de evaluar estos costes, están los siguientes: vida media de los equipos (cuanto menor sea dicha vida, mayores serán los costes de explotación y mantenimiento), el diseño de la planta (tipo de pretratamiento elegido, tipo de motobombas y turbinas elegidas, etc.), grado de automatización de la instalación, vida útil esperada de la instalación, mano de obra requerida para operar la planta, etc.

Por último, tenemos el tercer coste que interviene en el coste total del agua producida: el coste energético. Independientemente de la tecnología empleada, toda planta desalinizadora necesita una cierta cantidad de energía para su adecuado funcionamiento. Lo que si depende de la tecnología y del proceso elegido es la cantidad y el tipo de energía que requiere, ya que hay procesos que solo necesitan energía mecánica (Ósmosis Inversa y Compresión de vapor), mientras que otros necesitan el aporte de energía térmica, ya sea exclusivamente (Solar Stills) o parcialmente (procesos evaporativos).

Así pues, nos podemos encontrar con dos tipos de consumos energéticos: calor y/o energía mecánica. Hay que tener presente que decir energía mecánica equivale a decir «electricidad», ya que la energía mecánica es aportada al proceso mediante compresores o motobombas eléctricas.

La Tabla I muestra cuales son los consumos energéticos típicos de los diferentes tipos de plantas desalinizadoras, dados en kWh/m³ de agua producido, especificándose además el tipo de energía que requieren (eléctrica y/o térmica) (Ref. 1).

Una vez analizados cuales son los diferentes costes que intervienen en el precio final del agua producida, veamos algunos valores característicos para diferentes tipos de plantas desalinizadoras, con objeto de comparar un sistema solar térmico con los sistemas convencionales competidores.

Este análisis está centrado en plantas desalinizadoras de tamaño industrial, se van a comparar los costes de una planta solar térmica de desalinización mediante destilación en múltiple efecto, con los correspondientes de plantas convencionales mediante Ósmosis Inversa y mediante destilación en múltiple efecto.

Tabla I: Consumos Energéticos típicos de los principales procesos de desalinización.

	E. Eléctrica	E. Térmica
Ósmosis Inversa	6 - 12	0
Compresión de Vapor	17	0
Destilación en Multi Efecto	2,5	50 - 80
Flashing en Multi Etapa	5 - 4	40 - 70
Congelación	13	0
Solar Still	1.200	0

Al estudiarse plantas de tamaño industrial, lo que implica grandes producciones de agua desalinizada al día, los Solar Still no entran en este análisis, ya que tienen producciones pequeñas (menos de 5 litros de agua desalinizada por m² y día).

También conviene hacer hincapié, una vez más, en que las cifras que se dan son sólo orientativas, ya que resulta imposible poder dar cifras exactas sin conocer todos y cada uno de los parámetros de la instalación. Incluso los propios fabricantes de plantas desalinizadoras se muestran reticentes a la hora de dar cifras exentas de un importante margen de variación.

A continuación se dan los datos correspondientes a diferentes tipos de plantas desalinizadoras. Se han distinguido diversos tamaños de plantas, de acuerdo con la producción diaria de agua desalinizada (para cada uno de estos tamaños se dan los costes correspondientes a: Inversión, Operación y Mantenimiento, y Energía).

Como hipótesis de partida se ha supuesto un período de amortización de la instalación de 10 años para las plantas de hasta 2000 m³/día, y 15 años para las plantas mayores. En ambos casos se ha supuesto un interés bancario del 10%.

A) ÓSMOSIS INVERSA CONVENCIONAL Y/O ENERGÍA EÓLICA

La Tabla II muestra los costes típicos para este tipo de plantas. Se ha supuesto un precio de 12 ptas/kWh de electricidad para ambos casos, ya que los datos que hay disponibles procedentes de instalaciones eólicas muestran un coste muy similar al que tiene la energía eléctrica convencional. Por lo tanto, los costes totales de ambos tipos de sistemas de desalinización son muy similares.

Tabla II: Costes típicos de las Plantas convencionales de Ósmosis Inversas

	< 500	500 - 2000	2000 - 5000	5000 - 10000
Inversión	135	135 - 120	120 - 105	105 - 70
Operación y Mantenimiento	65	62 - 54	54 - 45	45 - 35
Energía	72	72 - 86	86 - 70	70 - 65
Total (pts/m³):	272	269 - 260	260 - 220	220 - 170

B) PLANTAS M.E.D. CONVENCIONALES

En este caso se han considerado dos opciones, según el tipo de combustible empleado: gasoil o gas natural. La Tabla III resume los costes de producción, en ptas/m³ de producto, que tienen este tipo de plantas cuando funcionan con gasoil. Se han considerado cuatro tamaños típicos de plantas: 150, 500, 1.000 y 5.000 m³/día.

En este tipo de plantas, los costes de operación y mantenimiento son sensiblemente inferiores a los de la Ósmosis Inversa, debido fundamentalmente a que no hay reemplazos de membranas. Por el contrario, el coste de la energía es el predominante aquí. Hay que indicar que se ha supuesto un P.R. de 6,3 para las plantas pequeñas, y un P.R. de 8,2 para las plantas medianas y grandes.

Tabla III: Costes típicos de plantas convencionales de destilación en múltiple efecto. (opción gasoil)

	150 m ³ /d	500 m ³ /d	1000 m ³ /d	5000 m ³ /d
Costes de Inversión	95	72	57	54
Operac. y Mantenim.	32	17	13	7
Coste Energía Eléctrica	33	30	26	17
Coste Energía Térmica	382	292	260	260
Coste total (ptas/m ³)	542	411	356	338

Si tenemos en cuenta el poder calorífico y el precio del gas, tendríamos el desglose de costes indicado en la Tabla IV, donde se observa una gran economía respecto a los de la Tabla III. Se ha considerado un precio de 2 ptas el kWh térmico generado con gas natural. También hay que recordar que este tipo de plantas consumen energía térmica a muy baja temperatura (alrededor de 70°C), por lo que también hay que considerar la posibilidad de disponer de calor residual con el que alimentar, total o parcialmente, a la planta desalinizadora.

Tabla IV: Costes de plantas convencionales de destilación en múltiple efecto (opción gas natural)

	150 m ³ /d	500 m ³ /d	1000 m ³ /d	5000 m ³ /d
Costes de Inversión	95	72	57	54
Operac. y Mantenim.	32	17	13	7
Coste Energía Eléctrica	33	30	26	17
Coste Energía Térmica	200	155	155	155
Coste total (ptas/m ³)	360	274	251	233

C) PLANTAS M.E.D. CON ENERGÍA SOLAR

El análisis de costes de este tipo de plantas no es sencillo, ya que entran en juego una gran diversidad de factores (campo de colectores solares, sistema de almacenamiento, sistema auxiliar de apoyo, etc.).

La diferencia fundamental entre este tipo de sistemas y un sistema convencional es que la energía térmica consumida por el proceso es, al menos parcialmente, suministrada por el sistema solar. Por consiguiente, el coste de esta energía térmica dependerá del coste de los colectores solares y del sistema de almacenamiento térmico. También el coste de inversión dependerá del coste del sistema solar.

Los costes de operación y mantenimiento son similares a los de una planta MED convencional. Teniendo en cuenta estas consideraciones, resulta más práctico mostrar un gráfico con los costes totales en función del coste de los colectores solares. La Figura 14 muestra dicho gráfico para una planta con una producción de 1000 m³/día.

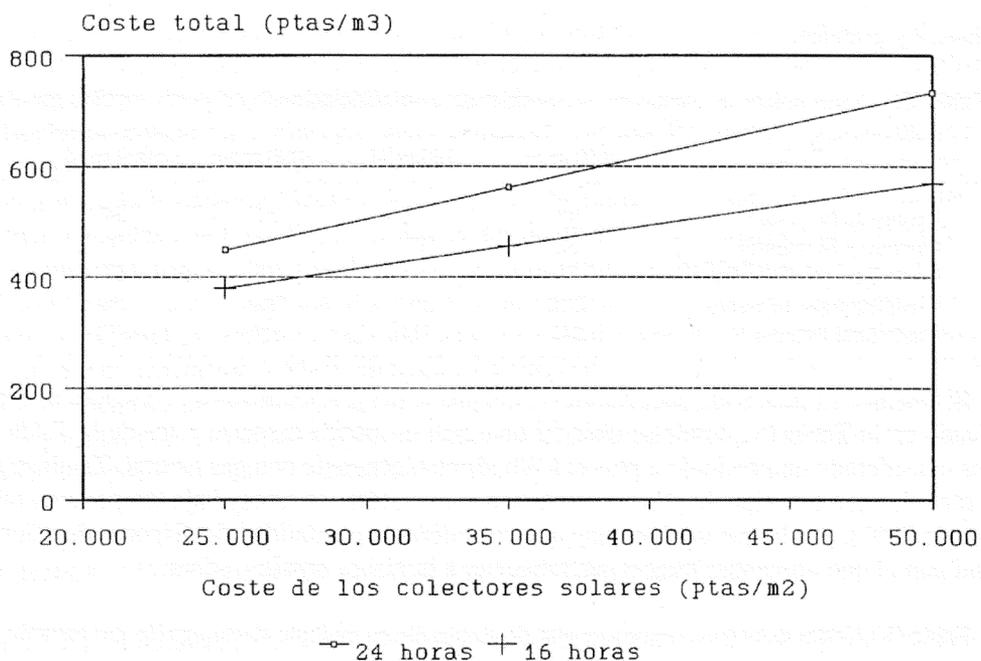


Figura 14. Variación del coste total en función del coste de los colectores solares

De acuerdo con el estado actual de la tecnología de colectores solares, la estimación de un coste de 20.000 ptas/m² es bastante realista a corto plazo, ya que se está consiguiendo un abaratamiento progresivo de los componentes. Lo mismo ocurre con el sistema de almacenamiento térmico; suponer un coste aproximado de 3.000 ptas/kWh es bastante realista, de acuerdo con la experiencia actual.

A la vista del análisis realizado se puede concluir que se están alcanzando los umbrales de competitividad económica para este tipo de sistemas, sobre todo si se tiene en cuenta las grandes ventajas que, desde el punto de vista medioambiental, tiene el uso de la energía solar : energía no contaminante y no sujeta a posibilidad de monopolio alguno. Esto nos permite ser optimistas respecto al futuro a medio y largo plazo de este tipo de aplicación de la energía solar.

REFERENCIAS

1. R. M. Morris; W. T. Hanbury: «Renewable Energy and Desalination: A Review». Proceeding presentado en el Seminario Europeo 'New Technologies for the use of Renewable Energy Sources in Water Desalination'. Atenas (Grecia), Septiembre de 1.991.
2. J. L. Sanchez Toribio:»Análisis Económico y Rentabilidad del Proceso de Ósmosis Inversa». Curso sobre el 'Uso de las Energías Renovables para la Desalinización del Agua de Mar', Plataforma Solar de Almería (Almería), 1.992.