

**DESALACIÓN DE AGUAS
ÓSMOSIS INVERSA
IMPLICACIONES
MEDIOAMBIENTALES Y LUCHA
CONTRA LA SEQUÍA**

Índice

2.1.- Introducción. Procesos de desalación. Capacidad de desalación

2.2.- Fundamentos del proceso de ósmosis inversa. Membranas de ósmosis inversa. Descripción de una planta desalinizadora de ósmosis inversa

2.3.- Impacto medioambiental de los vertidos de salmuera. Posibilidad de utilizar energías renovables en los procesos de desalación. Gestión del AGUA.

2.1.- Introducción. Procesos de desalación. Capacidad de desalación

El volumen total de agua en la hidrosfera es de $1400 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, estimándose que un 97.5% de la misma es salada, con un contenido en sales mayor del 3%, y que sólo el 2.5% representa el agua dulce. La mayor parte de esta agua dulce, el 69%, se encuentra bloqueada en forma de glaciares, y aproximadamente el 30% es agua subterránea fósil; en definitiva sólo resulta utilizable el 0.3% del agua dulce disponible, unos 93000 km^3 .

Entre las causas que fomentan las necesidades de agua dulce se encuentran:

- El crecimiento de la población
- El crecimiento de la industrialización
- El aumento del nivel de vida

Obtención de agua potable a partir de aguas salobres y de agua de mar

Para la obtención de agua dulce a partir de aguas salobres o marinas se han desarrollado distintos tipos de procesos. Estos a su vez se pueden agrupar en dos, aquellos basados en la separación del agua (como la destilación, congelación, procesos químicos y procesos de membrana), y los procesos que se basan en la separación de sales del agua (electrodialisis, cambio iónico y depuración química).

2.1.1.- Procesos basados en la separación del agua

En los sistemas de separación de agua mediante destilación podemos encontrar las siguientes tecnologías: la evaporación de múltiple efecto, la evaporación instantánea, la evaporación mediante compresión mecánica de vapor y finalmente la evaporación solar.

Otras tecnologías están basadas en el proceso de congelación y los procesos químicos de desalación mediante formación de hidratos, extracción con disolventes y, finalmente, la tecnología de membranas. En la Figura 1 se muestra un esquema de las distintas tecnologías.

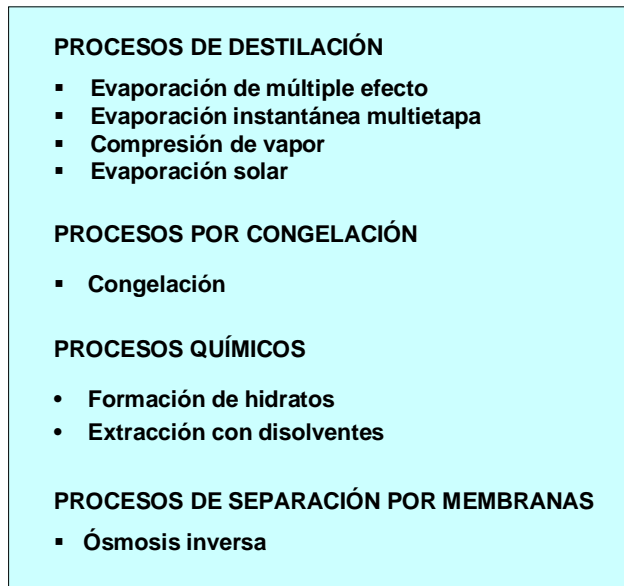


Figura 1.- Cuadro-resumen de los distintos procesos de separación del agua.

Evaporación de múltiple efecto. En la Figura 2 se representa un esquema de evaporación de múltiple efecto para evaporadores de tubos largos. En el primer efecto se consume energía (vapor) para hacer hervir el agua de mar. La solución concentrada pasa al segundo efecto. Allí condensa el vapor cediendo calor latente a la salmuera, que continúa evaporando agua y concentrándose, y así sucesivamente en los demás efectos. El vapor condensado en cada uno de los efectos produce vacío en la cámara anterior, vacío que, a su vez, favorece la evaporación. El avance de la salmuera en el sistema, determina un aumento ebulloscópico en la misma, consecuencia de su concentración en sales.

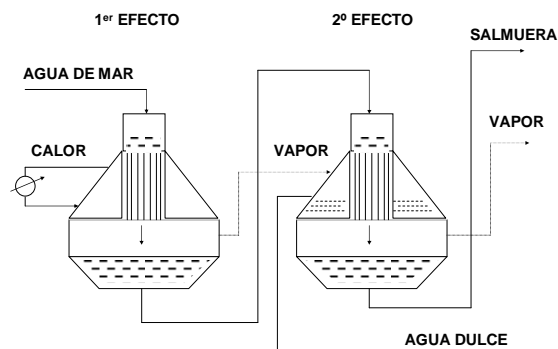


Figura 2.- Evaporación de tubos sumergidos, con más de una etapa.

Evaporación instantánea. En el proceso de destilación instantánea, el agua de mar se calienta en un intercambiador de calor con el vapor procedente de una caldera. El agua calentada entra en cada cámara encontrándose en ella una presión inferior a la que corresponde al equilibrio líquido-vapor a la temperatura a la que se encuentra, sufriendo una evaporación súbita. El vapor generado en la evaporación súbita se transforma en agua potable condensándose al recorrer los tubos del intercambiador que contienen agua que proviene de la siguiente etapa.

Compresión de vapor. En este caso el sistema incluye un compresor interno, que se ocupa de aumentar la presión y temperatura del vapor producido en el evaporador. El agua de mar se precalienta en contacto con un intercambiador y se introduce en el evaporador, el vapor generado se comprime aumentando ligeramente su presión y temperatura, y posteriormente se descarga como vapor sobrecalentado al interior de los tubos del evaporador, actuando éste como medio de calefacción.

Evaporación solar. Los colectores solares son el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de las poblaciones. Aprovecha la energía calorífica solar disponiendo el agua en balsas de gran desarrollo superficial sobre las que se crea una cámara húmeda que en la parte superior lleva planchas de vidrio o materiales plásticos traslúcidos donde condensan las gotas y resbalan hacia unos canales.

Congelación. Los procesos de congelación, se basan en el enfriamiento del agua de mar hasta que se congela parte del agua contenida en la misma. Los cristales de hielo así formados quedan flotando en la salmuera residual de la que deben separarse. Hay sistemas en los que la congelación se realiza por evaporación de disolventes no miscibles con el agua (isobutano, n-butano, diclorometano, etc.), aunque están poco desarrollados. En la Figura 3 se muestra un diagrama de flujo de un proceso de congelación.

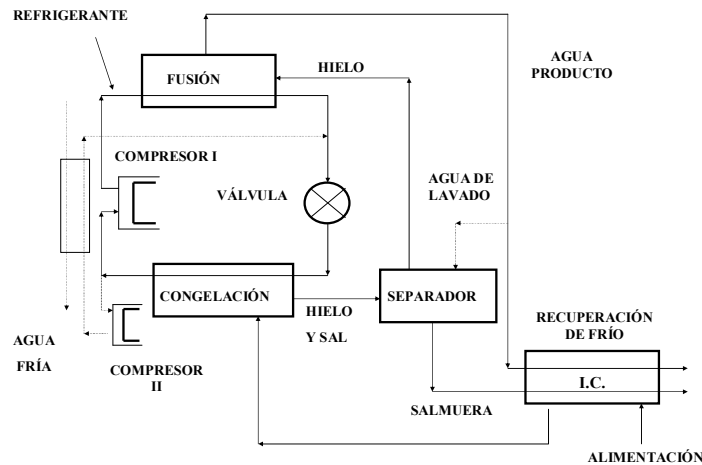


Figura 3.- Proceso de congelación de agua de mar para obtener agua dulce.

Formación de hidratos. Este método se basa en la posibilidad de obtener hidratos sólidos por combinación con derivados orgánicos halogenados, que se pueden separar de la salmuera y ser descompuestos posteriormente con recirculación del compuesto orgánico.

Extracción con disolventes. Este método se basa en la separación a través de un sistema formado por el agua salina y un disolvente orgánico. Dicho disolvente debe ser inmisible con la salmuera y parcialmente miscible en el agua pura.

2.1.2.- Procesos basados en la separación de las sales

En los procesos basados en la separación de sales se distinguen: la electrodiálisis, el intercambio iónico y la depuración química.

Electrodiálisis. El fundamento de esta operación está en la limitación del movimiento de los iones disueltos en el agua hacia los electrodos de una célula por la colocación de unas membranas selectivas, respectivamente, a aniones y cationes.

Intercambio iónico. Las exigentes condiciones que requieren las sustancias utilizadas como intercambiadores iónicos hacen que la salinidad máxima admitida para el agua a tratar no supere las 3500 ppm, lo que limita enormemente el procedimiento. Ha

sido utilizada para acondicionar aguas para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos de poca salinidad pero con un alto contenido en calcio y magnesio.

Depuración química. En este proceso el agua de mar es tratada con cloro y sulfato cúprico para precipitar la materia orgánica que posteriormente se separa. La adición de óxido de calcio y carbonato sódico a la corriente clarificada permite precipitar los iones: cloruro, sulfato, magnesio y calcio. El agua decantada de la operación anterior se trata con bicarbonato amónico, con lo que precipita el cloruro sódico. Finalmente, un tratamiento con carbón activo proporciona un agua de 200-300 ppm de sales. El carbón activo se regenera tratándolo con ácido clorhídrico y sosa caústica. En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso de desalación mediante depuración química.

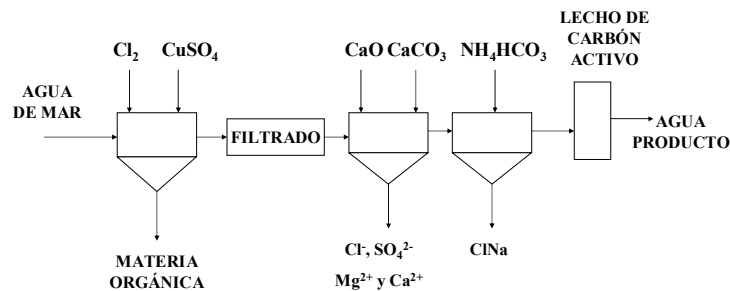


Figura 4.- Diagrama de flujo de un proceso de desalación de agua de mar mediante depuración química.

2.1.3.- Capacidad de desalación de aguas

De acuerdo con la IDA (*Internacional Desalation Association*), en el informe correspondiente al año 2000, el inventario total de unidades de desalación en el mundo asciende a 13600, con una capacidad total de producción de 26 Mm³/día, existiendo ya en el mundo un total de 120 países dotados de estas instalaciones. La distribución porcentual de las tecnologías en la actualidad se basa fundamentalmente en dos procesos básicos: la ósmosis inversa y la evaporación instantánea. En la Figura 5 se muestra la

capacidad mundial de desalación y distribución porcentual en cuanto a la tecnología adoptada.

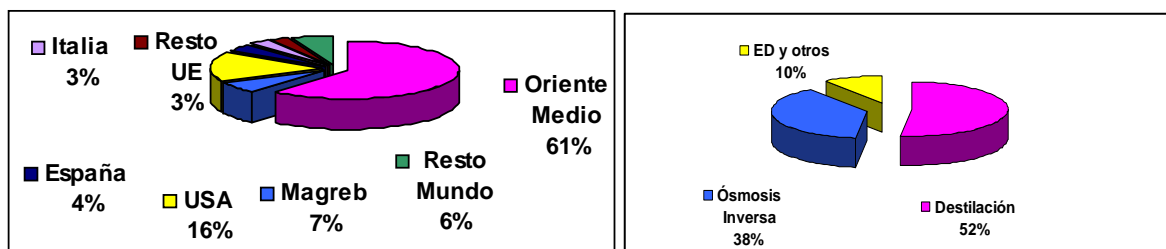


Figura 5.- Distribución porcentual de la capacidad mundial de desalación y distribución porcentual en cuanto a la tecnología adoptada en el mundo.

El reparto de la capacidad española instalada por procesos es la siguiente: el 87% se realiza por ósmosis inversa, el 9% mediante electrodiálisis y sólo el 4% a través de procesos de evaporación. En España hay actualmente una capacidad de desalación de 985000 m³/día en plantas instaladas de tamaño grande y de agua de mar; además existen 200000 m³/día en plantas pequeñas y de aguas salobres. La administración contempla la instalación de 22 nuevas plantas desaladoras de agua con una capacidad total del orden de 1700000 m³/día. El uso del agua es del 45-55% para abastecimiento a poblaciones, del 35-40% para regadío, y el 10-15% para usos industriales.

2.2.- Fundamentos del proceso de ósmosis inversa. Membranas de ósmosis inversa. Descripción de una planta desaladora de ósmosis inversa

Ósmosis inversa. Los procesos de separación por ósmosis inversa a través de membranas se basan en hacer pasar agua salada, a presión mayor que la osmótica, por una membrana selectiva que permite el paso del agua y no de las sales. Las membranas industriales retienen del 90 al 99% de todos los elementos minerales disueltos y el 100% de las materias coloidales más finas. En la Tabla 1 se muestra una clasificación de las membranas que pueden ser utilizadas en los procesos de ósmosis inversa.

Tabla 1.- Clasificación de las membranas de ósmosis inversa.

Parámetros	Tipos
Estructura	Simétricas Asimétricas
Naturaleza	Integrales Compuestas de capa fina
Forma	Planas Tubulares Fibra hueca
Composición química	Orgánicas Inorgánicas
Carga superficial	Neutras Catiónicas Aniónicas
Morfología de la superficie	Lisas Rugosas
Presión de trabajo	Muy baja Baja Media Alta
Técnicas de fabricación	De máquina Dinámicas

Para utilizar industrialmente las membranas de forma que soporten la presión de trabajo deben colocarse de una determinada manera, adoptando distintas formas o configuraciones. Las configuraciones existentes para los módulos o unidades de producción son:

- Módulos de placas
- Módulos tubulares
- Módulos espirales, y
- Módulos de fibra hueca

En la Figura 6 se muestra un diagrama de bloques de una planta de desalación de agua por ósmosis inversa, que es representativa de la forma de llevar a cabo el proceso industrial.

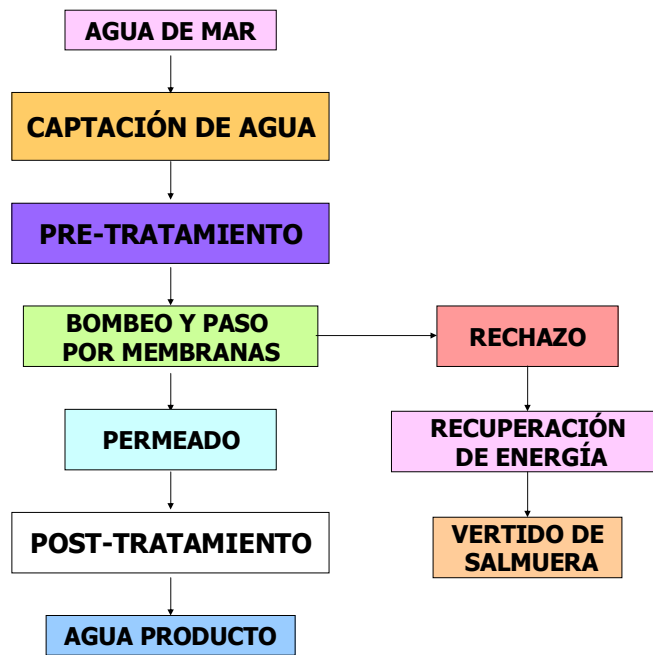


Figura 6.- Esquema de bloques de una planta de ósmosis inversa.

En la Figura 7 se ha realizado un diagrama de flujo del proceso de desalación de aguas mediante membranas de ósmosis inversa.

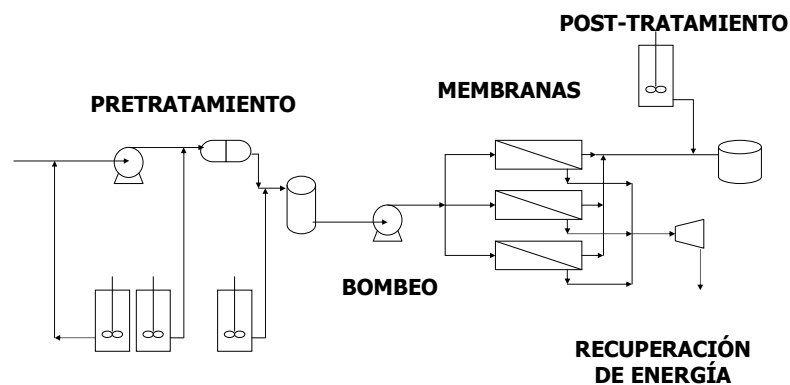


Figura 7.- Diagrama de flujo de proceso de una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

El agua de mar captada mediante pozos, o mediante tomas de captación abierta es bombeada hacia unos filtros de arena, donde se elimina la materia en suspensión hasta un tamaño de unas 100 micras. En algunas ocasiones es necesario realizar una desinfección, para eliminar las bacterias y virus y, si la cantidad de materia en suspensión es elevada, se debe añadir también un floculante. El agua después de filtrada se hace pasar por los microfiltros de cartucho de un paso inferior a 5 micras. Antes de la entrada en los filtros de cartucho se determina el índice de atascamiento (SDI), para corregir éste y garantizar que es inferior a 5, límite máximo permitido antes de su entrada en los módulos de membrana. Para evitar las incrustaciones se adiciona ácido (sulfúrico ó clorhídrico), y un anti-incrustante. Mediante una bomba de alta presión el agua de mar se hace pasar a través de las membranas obteniendo dos corrientes: una concentrada en sales, denominada “rechazo”, que posee una presión elevada y cuya energía es susceptible de ser recuperada mediante una turbina Pelton; y otra, pobre en sales, que se denomina “permeado”.

La corriente de agua permeada se conduce a su almacenamiento en donde recibe la dosificación de reactivos adecuada para dotarla de la calidad necesaria para su uso posterior.

Las últimas publicaciones acerca de los costos comparativos sobre las diferentes técnicas de desalación más utilizadas (evaporación instantánea, evaporación de múltiple efecto, compresión de vapor y ósmosis inversa), se reflejan en la Tabla 2. Los costes más bajos son para la ósmosis inversa, siendo más económica que las técnicas de desalación térmicas.

Tabla 2.- Costes comparativos de las distintas técnicas de desalación más utilizadas.

	Evaporación instantánea	Evaporación de múltiple etapa	Compresión de vapor	Ósmosis Inversa
Coste de instalación (€/m³)	1.200-1.500	800-1.000	950-1.000	700-900
Coste de producción (cént. /m³)	110-125	75-85	87-95	45-92

2.3.- Impacto medioambiental de los vertidos de salmuera. Posibilidad de utilizar energías renovables en los procesos de desalación. Gestión del AGUA

La salmuera se caracteriza por una concentración en sales muy elevada, variaciones de temperatura y de pH, por la presencia de una cierta cantidad de productos sólidos en suspensión, así como de sustancias detergentes. En el caso de las plantas que funcionan por destilación, la salmuera no concentra muchas sales y representa de 8 a 10 veces el volumen de agua desalado. En plantas de ósmosis inversa el volumen residual es menor (2,5 a 3 veces el volumen desalado) y el vertido tiene un contenido en sales muy elevado. En la Tabla 3 se resumen las sustancias añadidas durante el proceso de desalación, así como su función y su posible impacto en el sistema.

Tabla 3. Sustancias añadidas durante el proceso de desalinización, función y posible impacto en el sistema.

COMPUESTOS	ORIGEN/FUNCIÓN	IMPACTO
Metales pesados: Cu, Fe, Ni, Cr, Zn	Anticorrosión	Acumulación en el sistema, estrés a nivel molecular, eutrofización
Fosfatos	Anti-incrustantes	Macronutrientes, Eutrofización
BELGARD 2000 (Ac. Málico)	Anti-incrustantes	Desconocido
Cl ⁻	Antifouling	Formación de compuestos halogenados, carcinógenos y mutágenos
Ácidos grasos	Tensoactivos	Alteran las membranas celulares
Sulfuro de sodio	Anticorrosivo, captura O ₂	Desconocido
Ácido sulfúrico	Anti-incrustante	En grandes cantidades baja significativamente el pH del sistema
Residuos sólidos	Limpieza de membranas	Turbidez

Cuando este tipo de instalaciones comenzó a operar, la solución a la eliminación de la salmuera era bastante simple; devolverla al mar, pero desde hace unos años se han realizado los estudios oportunos sobre la influencia de estos vertidos en el ecosistema marino y ello no es recomendable.

El vertido de salmueras de las plantas desaladoras de agua de mar se produce generalmente desde la línea de costa hasta profundidades de unos 30 m, y en su gran mayoría sobre fondos blandos (arenas y fangos). En el Mediterráneo, las comunidades más características de estos fondos son las praderas de angiospermas marinas, las praderas de *Caulerpa Prolifera*, y el resto son fondos sin vegetación. En la Figura 8 se representa una sección esquemática de una barrera de *Posidonia Oceánica*.

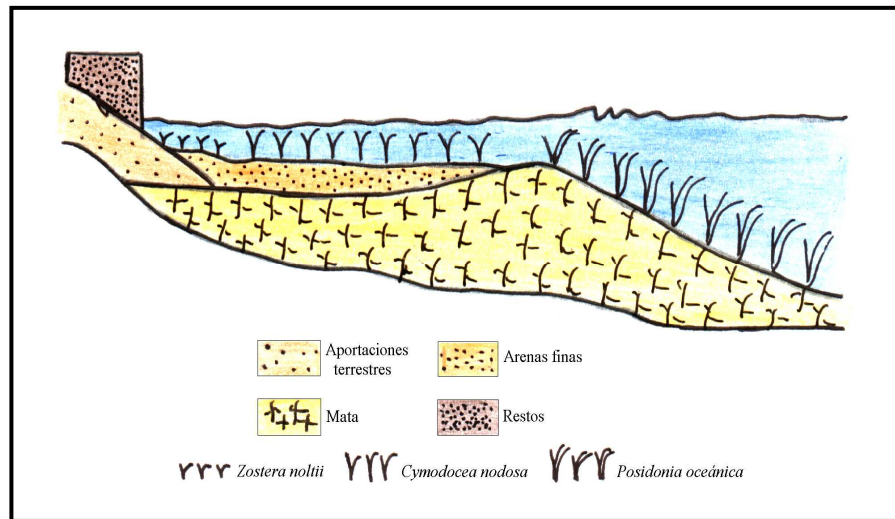


Figura 8. Sección esquemática de una barrera de *Posidonia Oceánica*.

Las praderas de angiospermas marinas son sistemas estructuralmente complejos que juegan un papel muy importante en la retención de sedimentos y en la protección de la línea de costa, así como en el control de los ciclos biogeoquímicos del litoral. Las praderas constituyen también el hábitat para un gran número de organismos; por ello se las considera refugios de biodiversidad. En las costas mediterráneas se encuentran cinco especies de angiospermas marinas de entre las cuales la endémica *Posidonia Oceánica* es la más abundante, presentando comunidades muy estructuradas, y con una gran producción de biomasa. La *Posidonia Oceánica* ha experimentado una notable regresión en las últimas décadas por lo que actualmente es una especie protegida por ley en las comunidades autónomas de Baleares, Cataluña, Valencia y Murcia, ya que está catalogada como hábitat prioritario por las directivas de la Unión Europea.

Estudios realizados por instituciones oficiales han fijado que la salinidad máxima tolerable es de 38.5 unidades prácticas de salinidad, que son aproximadamente equivalentes a 39 gramos por litro. Además, estos estudios indican que el vertido de las plantas desaladoras ha llevado a reducciones de poblaciones de peces, mortalidad de

plancton y corales en el Mar Rojo, mortalidad de manglares y angiospermas marinas en la laguna de Ras Hanjurah (Emiratos Árabes), o bien a una contaminación importante de los fangos por cobre y níquel en Key West (Florida).

2.3.1.- Energías renovables y desalación

No todas las fuentes de energía primaria renovable son igualmente adecuadas para los distintos procesos de desalación. Por tanto, hay que seleccionar la fuente energética en función del proceso. En la actualidad, los principales casos de integración desalación-energías renovables son los siguientes: el principal, y que permite una mayor capacidad de desalación, de hasta 300 m³/día, ha sido la integración de la energía eólica con ósmosis inversa. Otros dos casos importantes de integración, aunque orientados a plantas de menor capacidad, han sido la integración de la energía solar térmica con procesos de desalación por destilación, y de la energía solar fotovoltaica con procesos de desalación por ósmosis inversa.

Energía eólica y desalación por ósmosis inversa. La integración de la energía eólica y la desalación por ósmosis inversa se basa en utilizar la energía del viento, canalizada en forma de energía mecánica o eléctrica, para ejercer presión sobre una columna de agua salada, que al estar en contacto con una lámina semipermeable, sólo permite el paso de agua pura, reteniéndose las sales en la membrana.

El empleo de la energía eólica en los procesos de desalación por ósmosis inversa presenta como inconveniente principal la irregularidad del suministro energético, que impide que la desaladora opere de forma autónoma. Ante esto se han planteado dos posibles soluciones: Combinar la energía eólica con otras fuentes de energía, renovables o no. Es decir, emplear un sistema híbrido, para conseguir así un suministro continuo de energía. Se han usado, por ejemplo, energía eléctrica de la red, hidráulica o fotovoltaica. Una segunda opción, es desalar el agua directamente en instalaciones situadas mar adentro, para aprovechar la mayor regularidad y velocidad del viento. Son los llamados parques eólicos marinos, en la Figura 9 se muestra una fotografía.



Figura 9.- Parque eólico marino.

Energía solar térmica y desalación: la destilación solar. La segunda vía de integración de las energías renovables en los procesos de desalación la constituye la aplicación de la energía solar térmica en los procesos de destilación. En este caso, se presentan dos opciones. Una de ellas es la desalación solar térmica indirecta, en la que se emplean dos subsistemas, uno para la captación solar de energía y otro para efectuar la desalación. Un ejemplo son las unidades de destilación térmica, como la destilación súbita multietapa (MSF) y la destilación multiefecto (MED), acopladas a captadores solares, como los colectores cilíndrico parabólicos o receptores en torre.

La segunda opción es la desalación solar directa, en la que el colector y el destilador están integrados. Es el caso de los destiladores solares, que se basan en la utilización de la energía solar térmica, en general de baja temperatura, para la obtención de agua desalada a través del efecto de humidificación. En la Figura 10 se muestra un esquema del funcionamiento de un destilador solar.

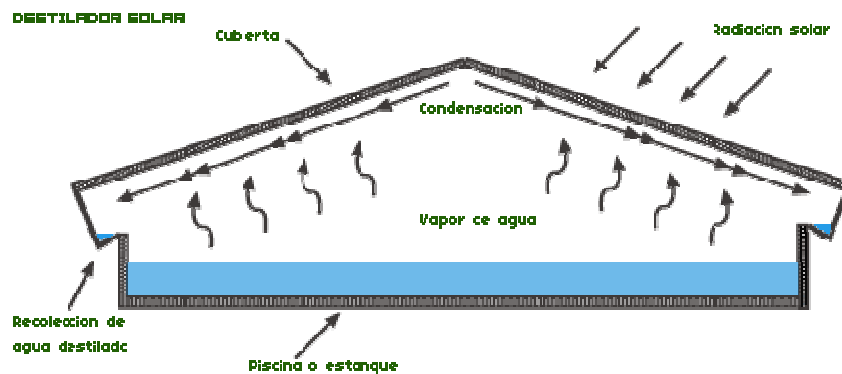


Figura 10.- Funcionamiento de un destilador solar.

El empleo de destiladores solares permite la obtención de un agua desalada de alta calidad. Sin embargo, los rendimientos son bajos, lo que trae consigo una baja productividad, entre 1 y 4 l/m² de superficie. Una opción para mejorar la productividad de los destiladores solares es emplear un destilador multiefecto.

Energía solar fotovoltaica y desalación por ósmosis inversa. La tercera vía de integración es el empleo de la energía solar fotovoltaica en la desalación por ósmosis inversa. Para ello, se usa un sistema de captación fotovoltaica que genera una corriente eléctrica, alimentando una bomba de alta presión para bombear el agua a desalar en los procesos de ósmosis inversa.

El principal problema a la hora de usar esta tecnología, es el alto coste del kWh generado mediante energía solar fotovoltaica. Las soluciones propuestas pasan por reducir el consumo energético de los sistemas. Una de las más empleadas es el uso de variadores de frecuencia, que hacen que la frecuencia de giro de la bomba que lleva el agua a las membranas, y por tanto la potencia de la que puede hacer uso, sea proporcional a la radiación existente en cada instante.

2.3.2.- El Programa A.G.U.A.

El programa A.G.U.A. (“Actuaciones para la gestión y la utilización del agua”), enmarcado dentro del Plan Hidrológico Nacional y orientado a garantizar la disponibilidad y calidad del agua en todo el territorio, ha presentado recientemente un programa especial, de “Energías renovables para la desalación”, que propone una serie de medidas concretas, en materia de promoción de energías renovables y ahorro energético en desalación. Dicho programa contempla un incremento de la potencia instalada de fuentes renovables de 1120 MW, lo que supondría un incremento de la producción energética de 2875 GWh anuales y permitiría, según las previsiones, abastecer con energías renovables el incremento previsto en la actividad desaladora.