

# **La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables**

**Carlos de la Cruz**

Documento de trabajo 88/2006



## **Carlos de la Cruz**

Ingeniero industrial (Universidad Politécnica de Madrid) y Máster en Dirección de Empresas (Escuela de Negocios). Ha colaborado en la elaboración del Plan Nacional de I+D+i (2000-2003 y 2004-2007) y ha participado como experto en diversos estudios de prospectiva tecnológica para el Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial, dirigidos al desarrollo de las políticas de I+D+i nacionales y de la Unión Europea (proyecto MANVIS).

Trabaja en el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) como Jefe del Departamento de Coordinación y Dinamización (2005). Con anterioridad ha ocupado en el CDTI el puesto de Jefe del Departamento de Tecnologías de Producción (1996-2005), en cuyo desempeño ha sido responsable de la evaluación técnica y comercial de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico de diversos sectores y tecnologías enmarcados en esta área, en la cual había trabajado previamente como técnico de evaluación (1990-1996). Su carrera profesional la inició en CAMPSA como técnico de la Subdirección de Proyectos y Obras (1988-1990).

En su trayectoria en el CDTI, además de las tareas propias de la evaluación, ha elaborado documentos de discusión interna sobre la situación de distintos sectores industriales y tecnologías, entre ellos la desalación de agua de mar. Asimismo ha impartido diversos cursos de transferencia de tecnología y ha participado en numerosas jornadas para el fomento de actividades de investigación y desarrollo tecnológico empresarial.

Ninguna parte ni la totalidad de este documento puede ser reproducida, grabada o transmitida en forma alguna ni por cualquier procedimiento, ya sea electrónico, mecánico, reprográfico, magnético o cualquier otro, sin autorización previa y por escrito de la Fundación Alternativas

© Fundación Alternativas

© Carlos de la Cruz

ISBN: 84-96653-01-3

Depósito Legal: M-18963-2006

## Contenido

<b>Resumen ejecutivo</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Las necesidades de agua y el uso sostenible del agua</b> .....	<b>7</b>
1.1 La escasez de agua potable .....	7
1.2 El consumo de agua .....	8
1.3 Los precios del agua .....	9
1.4 Necesidades hídricas de las cuencas mediterráneas .....	10
1.5 Uso sostenible del agua .....	11
<b>2 La desalinización de agua de mar</b> .....	<b>12</b>
2.1 Evolución histórica .....	12
2.2 Importancia cuantitativa de la desalación como fuente de agua potable .....	13
2.3 Procesos industriales de desalación de agua de mar por destilación .....	15
2.4 Procesos industriales de desalación de agua de mar con membranas .....	17
2.5 Calidad del agua desalada .....	18
2.6 Aspectos medioambientales de la desalinización .....	19
2.7 El coste del agua desalada .....	21
2.8 Tendencias tecnológicas .....	23
2.9 Capacidad tecnológica de España en el campo de la desalinización .....	26
<b>3 Las energías renovables</b> .....	<b>28</b>
3.1 Evolución histórica .....	28
3.2 La importancia de las energías renovables entre las fuentes de energía primaria .....	29
3.3 Perspectivas futuras .....	33
3.4 Tipos de energías renovables de mayor potencial en el campo de la desalinización .....	34
3.5 Aspectos medioambientales de las energías renovables .....	37
3.6 El coste de las energías renovables .....	38
3.7 Tendencias tecnológicas .....	39
3.8 Capacidad tecnológica de España en el campo de las energías renovables .....	41
<b>4 La desalación de agua de mar mediante el empleo de energías renovables</b> .....	<b>43</b>
4.1 Situación actual de la aplicación de las energías renovables a la desalinización .....	43
4.2 Proyectos relevantes de demostración .....	45
4.3 El coste del agua desalada con energías renovables .....	47
4.4 Tendencias tecnológicas .....	52

4.5 Capacidad tecnológica de España en la desalinización de agua de mar con energías renovables .....	54
<b>5 Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>56</b>
<b>Índice de Tablas y Gráficos .....</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>60</b>

### Siglas y abreviaturas

ADEyR	Asociación Española de Desalación y Reutilización
AGUA	Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua
BOE	Boletín Oficial del Estado
BOP	Boletín Oficial de la Provincia
CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CE	Comunidades Europeas
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CENER	Centro Nacional de Energías Renovables
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CV	Compresión de vapor
DMA	Directiva Marco de Aguas
ED	Electrodialisis
EDR	Electrodialisis reversible
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FEDER	Fondo Europeo de Desarrollo Regional
I+D+I	Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica
ICO	Instituto de Crédito Oficial
IDA	Asociación Internacional de Desalación
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía
IEA	Agencia Internacional de la Energía
INE	Instituto Nacional de Estadística
MED	Destilación multiefecto
MITYC	Ministerio de Industria, Turismo y Comercio
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MSF	Destilación súbita multietapa
OEPM	Oficina Española de Patentes y Marcas
OI	Ósmosis inversa
OPTI	Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial
PM	Programa Marco
PSA	Plataforma Solar de Almería
RSU	Residuos sólidos urbanos
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
UE	Unión Europea

## La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables

**Carlos de la Cruz**  
Ingeniero industrial

Las cuencas mediterráneas tienen unas necesidades de agua crónico, que se agudiza en períodos de sequía como los sufridos actualmente. Hoy en día, la desalación de agua de mar en España aporta el 2% de los recursos hídricos y, aunque tiene un coste elevado en energía e inversión, se siguen produciendo avances técnicos que reducen progresivamente estos costes. Actualmente, el precio del agua desalada puede ser asumido en el abastecimiento urbano y en la agricultura de alto valor añadido, pero difícilmente en el resto de usos. Las previsiones apuntadas por el Programa Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua (AGUA) del Ministerio de Medio Ambiente cifran en 600 millones de m<sup>3</sup>/año el incremento de recursos hídricos que tendrán como origen la desalación.

Desde un punto de vista técnico, hay que diferenciar los procesos de desalación por evaporación, que necesitan energía térmica o calor, de los procesos de separación con membranas semipermeables u ósmosis inversa, que utilizan energía eléctrica y que son los de menor consumo energético e inversión. Su aplicación al Programa AGUA ocasionará el 1% de las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas al sistema eléctrico nacional.

Por otra parte, España tiene una elevada disponibilidad de energía primaria de origen renovable, siendo la energía eólica la que tendrá un mayor impacto a corto y medio plazo, tanto por la inversión que necesita como por la mayor capacidad para obtener grandes potencias. La energía solar todavía se encuentra en fase de investigación para conseguir potencias elevadas por unidad de superficie y reducir su elevado coste.

Este trabajo tratará de mostrar que la desalación de agua de mar con energías renovables técnicamente es viable, puesto que se han realizado proyectos de investigación que lo demuestran, combinando distintas tecnologías: eólica-ósmosis inversa, fotovoltaica-ósmosis inversa y solar térmica-destilación. Se trata de prototipos que desalan pequeñas cantidades de agua y están ubicados en zonas remotas o aisladas de la red eléctrica, donde el coste es un factor secundario frente a la necesidad perentoria de agua. Sin embargo, su implantación en zonas conectadas a la red eléctrica no ha suscitado gran interés, y no se ha construido ninguna planta de tamaño medio.

Desde el punto de vista económico, la desalación por ósmosis inversa utilizando energía eólica es, actualmente, la integración de procesos más viable. Sin embargo, si funciona aislada de la red, la planta de desalación no utilizará más del 25% de la capacidad, debido a la inestabilidad de los recursos eólicos y, por consiguiente, la amortización de la inversión con menor producción elevaría el coste del agua desalada. Por el contrario, si la planta de desalación se conecta a la red eléctrica cuando no haya potencia eólica suficiente, el coste del agua desalada resultaría competitivo con el obtenido de utilizar exclusivamente electricidad convencional de la red, y tiene la ventaja de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Este estudio no considera los efectos de la venta de energía eólica a la red ni la obtención de posibles subvenciones para las inversiones, en cuyo caso se reducirían notablemente los costes del agua desalada.

Para el desarrollo e implantación de estas tecnologías de desalación mediante energías renovables sería recomendable adoptar una serie de medidas:

- Promover el desarrollo e implantación de proyectos de demostración de desalación de agua de mar con energía eólica para capacidades entre 2.500 y 30.000 m<sup>3</sup>/día. Deberían establecerse mecanismos de coordinación de la Administración central y de las autonómicas con competencias en el ámbito del agua, medio ambiente y energía, para potenciar estas implantaciones. El liderazgo debería correr a cargo del Ministerio de Medio Ambiente.
- Estudiar un sistema de gestión global de explotación de los recursos hídricos que asegure la adquisición del agua desalada producida, puesto que, de lo contrario, las amortizaciones de la planta encarecerán más su coste. En este estudio deben participar las administraciones y las empresas suministradoras de aguas.
- Facilitar la interconexión entre las plantas y la red eléctrica para favorecer el intercambio de energía, demandada o excedente.
- Aplicar incentivos financieros a estos proyectos, al igual que sucede con las energías renovables, apoyándolos con subvenciones y financiación pública a bajo tipo de interés.
- Fomentar las actividades de I+D+i que contribuyan a reducir los costes mediante subvenciones y créditos blandos, realizadas por consorcios con alta capacidad industrial, coordinando a las entidades competentes, los Ministerios de Industria, Turismo y Comercio (y del CDTI como parte integrante del mismo), de Educación y Ciencia, Medio Ambiente y Fomento, y a los departamentos de innovación de las comunidades autónomas.

# 1. Las necesidades de agua y el uso sostenible del agua

## 1.1 La escasez de agua potable

El agua dulce es un bien escaso en nuestro planeta\*: por cada litro de agua superficial que discurre por los ríos, lagos y embalses, hay otros 100 litros de aguas subterráneas, 230 litros de agua en forma de hielo en los polos y 13.000 litros de agua salada en los mares y océanos<sup>1</sup>.

---

**Tabla 1. Grado de salinidad del agua, según su procedencia**

---

Tipo de agua	Salinidad g/l
Río o salobre de baja concentración	0,5-3
Salobre	3-20
Mar	20-50
Salmuera	> 50

---

Fuente: Wangnick (2004)

---

De esta pequeña proporción de agua dulce, sólo una parte se puede considerar potable o apta para el consumo humano; el resto del agua está contaminada por elementos químicos y biológicos perjudiciales para la salud. Todavía en el siglo XXI hay 1.000 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a agua potable sin contaminar. De hecho, esta carencia es la principal causa de transmisión de enfermedades y hospitalización, y todos los años mueren dos millones de niños a causa de las infecciones debidas a la carencia de agua potable (Malloch, 2003).

---

\* El autor desea mostrar su agradecimiento a Maurici Lucena, Andrés Zabara y Luis Enrique San José por los comentarios y consejos que me han dado para clarificar este documento. También quiero dar las gracias a Miguel Ángel Plaza, Daniel Esteban y Mariano de la Cruz, y al Cabildo de Fuerteventura por su atención conmigo. Por último, no quisiera pasar por alto la paciencia y el apoyo de mi mujer y mi hija. Los errores que pudiera contener este trabajo son de mi entera responsabilidad.

<sup>1</sup> Para mayor información, véase documento de desalación de Hispagua-CEDEX. <http://hispagua.cedex.es/documentacion/especiales/desalacion.php?localizacion=Desalaci%F3n>.

El panorama para los próximos 20 años no es nada esperanzador, porque el aumento de población y del nivel de vida de las sociedades en vías de desarrollo incrementará la demanda de agua potable. Por el contrario, su disponibilidad se verá reducida por una mayor contaminación de los recursos hídricos, el cambio climático y el aumento de la salinidad de los suelos, que reducirá la capacidad del terreno para retener el agua y empeorará la calidad de la misma para el consumo (Blanco y Alarcón, 2004). Según el informe sobre desalación de Hispagua, el suministro medio de agua por habitante se reducirá a un tercio del actual, de modo que para el año 2050 se especula con que el número de países que sufran escasez de agua pase de los 26 contabilizados en la actualidad a 66.

El agua no es sólo un elemento necesario para la vida del planeta. El agua ha sido y sigue siendo desde los inicios de la humanidad una fuente de riqueza y una cuestión geopolítica estratégica. Históricamente, la disponibilidad de agua ha condicionado el asentamiento de poblaciones junto a los ríos, a las que proveían de alimentos y constituían una vía de comunicación. La gestión del agua ha posibilitado el desarrollo de la agricultura y su potabilidad ha mejorado la salud pública. Ha sido una fuente de energía y un componente fundamental para el desarrollo industrial. El agua es, asimismo, un bien cuya demanda aumenta con la renta, ya que el consumo de agua *per cápita* en los hogares con mayor poder adquisitivo es superior, así como el consumo *per cápita* en las zonas turísticas.

En la actualidad la disponibilidad de agua potable se considera un derecho universal. En épocas anteriores, su escasez condicionaba la forma de vida de las poblaciones y el tipo de actividad económica que podía desarrollarse. Sin embargo, en el siglo XXI y en las sociedades más avanzadas se exige su disponibilidad en cualquier lugar para satisfacer necesidades que van más allá de las necesidades primarias, como la sed o la higiene personal. En este sentido, el desarrollo de políticas de abastecimiento y de tecnologías adecuadas podría responder a esta demanda, pero conviene tener presente que cualquier política y tecnología que se aplique tendrá un coste y un beneficio económico, social y medioambiental asociado.

## 1.2 El consumo de agua

En España, según el INE, el consumo medio de agua por habitante en el año 2003 fue 167 l/día, cifra que está en el mismo orden que el resto de países europeos<sup>2</sup>. Sin embargo, en cuanto país mediterráneo, esta cifra es muy superior a las de países como Marruecos, Argelia e Israel, en los que la escasez ha impulsado un consumo más racional y acorde

---

<sup>2</sup> El consumo medio de agua en la UE en el año 2001 fue de 120 l/día *per cápita* en la estación de invierno y de 180 l/día *per cápita* en verano.



con su disponibilidad, que está en un rango de 45 a 78 l/día *per cápita* (Loupassis, 2002:31).

El consumo de agua en España en el año 2003 alcanzó los 22.581 hm<sup>3</sup>, de los cuales el 78% se dirigió a explotaciones agrarias y 5.000 hm<sup>3</sup> se destinaron al abastecimiento público urbano. En las redes públicas de distribución se perdió el 18,7% del agua por causa de fugas y roturas. Otro de los principales problemas existentes es la utilización de técnicas de riego de bajo aprovechamiento del agua, como es el caso del riego por gravedad, que gasta el 69% del agua empleada en riego<sup>4</sup>. Sería necesario fomentar (con subvenciones agrícolas y financiación preferencial, si es preciso) la modernización de las técnicas de riego y el cambio a cultivos de mayor valor añadido y que se adapten a los recursos hídricos disponibles.

### 1.3 Los precios del agua

La Directiva Marco de Aguas (DMA)<sup>5</sup> establece, en primer lugar, que el agua no es un bien comercial como los demás, sino un patrimonio que hay que proteger y defender; y también señala la necesidad de recuperar los costes de los servicios relacionados con ella, incluidos los costes medioambientales. La política de precios del agua ya tiene en cuenta los costes de abastecimiento y saneamiento, así como el tipo de uso (doméstico, industrial, agrícola...), penaliza los altos consumos y fomenta el uso de agua reutilizada o depurada. Sin embargo, no tiene en consideración la escasez ni la abundancia temporal del recurso, por lo que el precio es igual en temporadas secas y en las húmedas, no teniendo incidencia sobre los hábitos del consumidor<sup>6</sup>.

El precio medio del agua en el año 2003, según datos del INE, fue de 0,86 €/m<sup>3</sup>. Los precios más elevados correspondieron a las Comunidades Autónomas de Canarias (1,68 €/m<sup>3</sup>), Baleares (1,42 €/m<sup>3</sup>) y País Vasco (1,15 €/m<sup>3</sup>). Por el contrario, La Rioja (0,54 €/m<sup>3</sup>), Castilla y León (0,53 €/m<sup>3</sup>) y Castilla La Mancha (0,57 €/m<sup>3</sup>) presentaron los precios más bajos.

Dado que este artículo trata de la desalación, es interesante mostrar, por ejemplo, que en Murcia en el año 2002 el precio del agua para regadíos estaba entre 0,35 €/m<sup>3</sup> para

---

<sup>3</sup> 1 hm<sup>3</sup> equivale a 1.000.000 de m<sup>3</sup> y a 1.000.000.000 de litros.

<sup>4</sup> Datos correspondientes al año 2003 del Instituto Nacional de Estadística, según la Encuesta sobre el suministro y tratamiento del agua y la Encuesta del uso del agua en el sector agrario.

<sup>5</sup> Diario Oficial de las Comunidades Europeas (CE), Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo 22 de diciembre de 2000. [http://europa.eu.int/eur-lex/pri/es/oj/dat/2000/l\\_327/l\\_32720001222es00010072.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/pri/es/oj/dat/2000/l_327/l_32720001222es00010072.pdf).

<sup>6</sup> Un artículo de Vicente Boceta (2001) señala que la ausencia de un sistema de derechos de propiedad sobre el agua y la inexistencia de un sistema de precios que refleje su escasez o su abundancia relativa son los factores fundamentales que impiden una gestión eficiente de este factor de producción.

agua desalada, 0,20 €/m<sup>3</sup> para agua subterránea y 0,02 €/m<sup>3</sup> para agua superficial. También resulta reseñable el caso de la isla de Lanzarote, que consume el 84% del agua de procedencia desalada (Hernández, 2000). El precio de esta agua para uso doméstico varía desde 0,75 €/m<sup>3</sup> para los primeros 30 m<sup>3</sup> de consumo, hasta 2,40 €/m<sup>3</sup> cuando el consumo supera los 40 m<sup>3</sup>. Si el uso es agrícola, el precio va desde 0,60 €/m<sup>3</sup> para el volumen de agua asignado, hasta 1,80 €/m<sup>3</sup> para el exceso de consumo sobre dicho volumen. En el caso de utilizar agua depurada para agricultura, el precio se reduce a 0,21 €/m<sup>3</sup>.

## 1.4 Necesidades hídricas de las cuencas mediterráneas

En el año 2000, el balance elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente entre la demanda máxima y la disponibilidad de agua daba un resultado deficitario de 4.807 hm<sup>3</sup> para las cuencas del Segura, Júcar, Sur y Cataluña<sup>8</sup>. El gran aumento de la demanda de agua en el litoral Sur y en Levante se ha debido, principalmente, al incremento tanto de la producción agrícola de regadío como de la población de carácter turístico, que en períodos de sequía prolongada como la actual puede ocasionar problemas de abastecimiento, con importantes restricciones para el riego.

A finales de septiembre de 2005 (fin del año hidrológico), los embalses españoles estaban en el 38,4% de su capacidad, debido principalmente a la reducción de las precipitaciones habidas durante el año, que han sido las menores de los últimos 15 años. La situación más alarmante corresponde a la cuenca del Segura, en la que el nivel de los embalses es del 10,3%. Más preocupante aún fue el año 1995, en el que, tras cuatro años de sequía, el agua embalsada en España llegó al 30% de la capacidad total<sup>9</sup>.

Con el fin de paliar estos problemas, el Programa Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua (AGUA) del Ministerio de Medio Ambiente contempla una serie de actuaciones para el arco mediterráneo, la mayor parte de ellas urgentes, que implican unas aportaciones totales de 1.100 hm<sup>3</sup>, con una inversión total estimada de 3.900 millones de euros. Dentro de estas actuaciones, la desalación y recuperación tienen un destacado protagonismo, con una previsión de producción anual de 600 hm<sup>3</sup>/año<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> BOP de 7 de enero de 2005. <http://www.fcca.es/Docs/Tarifas%20INALSA%2004.pdf>. <http://inalsa.es>.

<sup>8</sup> El desierto que viene, *El País*, 27 de junio de 2005. La crisis del agua, *El País*, 28 de junio de 2005.

<sup>9</sup> El nivel del agua de los embalses desciende por debajo del 50% de su capacidad, *El País*, jueves 28 de julio de 2005. Los ríos llevan un 57% menos de agua que hace un año, *El País*, miércoles 5 de octubre de 2005.

<sup>10</sup> Ministerio de Medio Ambiente <http://www.mma.es/agua/programa/desalacion.htm>.

## 1.5 Uso sostenible del agua

Como es evidente, la demanda de agua crece en España cada año y, sin embargo, los recursos potenciales siguen siendo los mismos. El mantenimiento sostenible de un recurso escaso como el agua implica realizar una explotación responsable, de modo que el balance resultante entre la incorporación de nuevos recursos y el aumento del consumo sea cero. Para llegar a esta situación hay que mejorar el uso del agua, con fórmulas de gestión y de ahorro a todos los niveles, la reducción de las pérdidas de la red de abastecimiento, la reutilización de agua para usos específicos y el fomento del empleo de técnicas de riego de menor consumo. Hay que estudiar el impacto que pueda tener la implantación de nuevas actividades turísticas, industriales y agrícolas sobre los recursos hídricos, potenciando un desarrollo sostenible.

También hay que explotar responsablemente los acuíferos y pozos subterráneos, evitando el aumento de su salinidad, la disminución del nivel freático y el posible aumento de la desertización; asimismo hay que diseñar una política adecuada de almacenamiento y reparto del agua, con embalses y trasvases que conjuguen el desarrollo económico con el impacto medioambiental y social que generan sobre las zonas donantes y receptoras del agua.

Una política de precios que tenga en cuenta la escasez o abundancia temporal de agua dulce también puede contribuir a reducir su mal uso, sin que esta medida sustituya a las campañas de sensibilización de la opinión pública sobre la necesidad de ahorrar agua.

Finalmente, es obvia la necesidad de incorporar nuevos recursos a la red de abastecimiento hídrico, y las tecnologías de desalinización de agua de mar pueden aportar un volumen adicional de agua (con el que no se ha contado hasta el momento), que es abundante en la naturaleza, que no compite en el reparto del agua dulce con las otras zonas geográficas, que no disminuye en épocas de sequía y cuya producción se puede localizar en las proximidades de las zonas de consumo, en la mayoría de los casos.

## 2. La desalinización de agua de mar

### 2.1 Evolución histórica

Básicamente, la desalación o desalinización de agua de mar, o salobre, en cantidades industriales se basa en dos tipos de procesos: los de destilación o evaporación, que necesitan calor o energía térmica para separar agua dulce, y los procesos de membranas semipermeables, que utilizan electricidad para impulsar el agua hacia las membranas, reteniendo éstas las sales en una solución acuosa más concentrada o salmuera.

La primera patente sobre desalación data de 1675. En el año 1717 un médico francés llamado Gauthier construyó el primer aparato de destilación destinado a la desalación de agua de mar, basado en el alambique, ya conocido en la Edad Media<sup>11</sup>. La primera planta industrial data del año 1872, cuando Carlos Wilson construyó en Chile una planta de destilación solar de 22,5 m<sup>3</sup>/día sobre una superficie de 4.757 m<sup>2</sup>. A comienzo del siglo XX se construyeron las primeras plantas portátiles para asegurar el abastecimiento de agua a las tropas en guerra (Zarza, 1999).

Por otra parte, los primeros procesos de implantación industrial se basaron en la tecnología de evaporación, denominada destilación súbita multietapa (MSF), que tiene su origen en 1957, y que evolucionó en los años setenta hacia los procesos de destilación multiefecto (MED) y compresión de vapor (CV). Asimismo, el proceso de electrodiálisis (ED) data de 1954, si bien fue en los años setenta cuando experimentó un gran avance con la reversibilidad del proceso (EDR).

Finalmente, con el desarrollo de una membrana artificial semipermeable, utilizando acetato de celulosa, Loeb y Sourirajan abrieron las puertas en los años setenta a los procesos de desalación por ósmosis inversa (OI), que alcanzaron su madurez tecnológica en los años ochenta para aguas salobres, y en los noventa para agua de mar.

La evolución histórica de las tecnologías de desalación en España queda claramente registrada en las islas Canarias, con la construcción de la primera planta en el año 1964 en Lanzarote con tecnología MSF, la introducción de las tecnologías CV en 1972, OI para

---

<sup>11</sup> Crónica de la Técnica (1989), Barcelona, Plaza y Janés.

aguas salobres en 1976, OI para agua del mar en 1984 y la implantación del proceso EDR en 1986. A la península llegó la primera planta en 1993, en el Cabo de Gata (Almería), y la de mayor capacidad se ha construido en Carboneras (Almería), en el año 2004, con una capacidad de desalación de 125.000 m<sup>3</sup>/día<sup>12</sup>.

El proceso de destilación súbita multietapa avanzó muy rápidamente, en cuanto a capacidad instalada, en los países de Oriente Medio, por la disponibilidad y bajo coste del petróleo. Sin embargo, debido a su alto coste energético, ha ido perdiendo paulatinamente cuota de mercado frente a la ósmosis inversa, proceso líder en la actualidad, debido a la reducción de los consumos energéticos específicos y a la modularidad y escalabilidad de las plantas, permitiendo la construcción de plantas pequeñas y muy grandes. En el año 2003 el 47% de la capacidad instalada en el mundo utilizaba tecnología de ósmosis inversa, frente al 36% que utiliza el proceso de destilación súbita multietapa. Si se restringe a agua de mar, el 61% corresponde a proceso MSF y el 27% a ósmosis inversa, debido al aporte de las plantas más antiguas de gran capacidad, que son de tecnología MSF (Wangnick, 2004).

En España la diferencia del grado de implantación de los procesos es más acusada. La ósmosis inversa tiene una cuota de mercado del 87%, mientras que el resto tiene una participación simbólica en el mercado: ED 4%, MSF 3%, CV 3%, MED 2% y nanofiltración 0,5% (Izaguirre, 2004).

## 2.2 Importancia cuantitativa de la desalación como fuente de agua potable

### A) Situación en el mundo

El 39% de la población vive a una distancia inferior a 100 km del mar. La desalación se ha convertido en una alternativa para el abastecimiento de agua a islas y zonas costeras con elevadas demandas y recursos escasos. Actualmente, la producción total de agua desalada en el mundo podría cubrir las necesidades de una población algo superior a los 100 millones de habitantes<sup>13</sup>.

En el año 1971 la capacidad de desalación mundial era 1,5 hm<sup>3</sup>/día (Semiat, 2001:8), mientras que en el año 2003 fue de 37,75 hm<sup>3</sup>/día (Wangnick, 2004), de los cuales el 64%

---

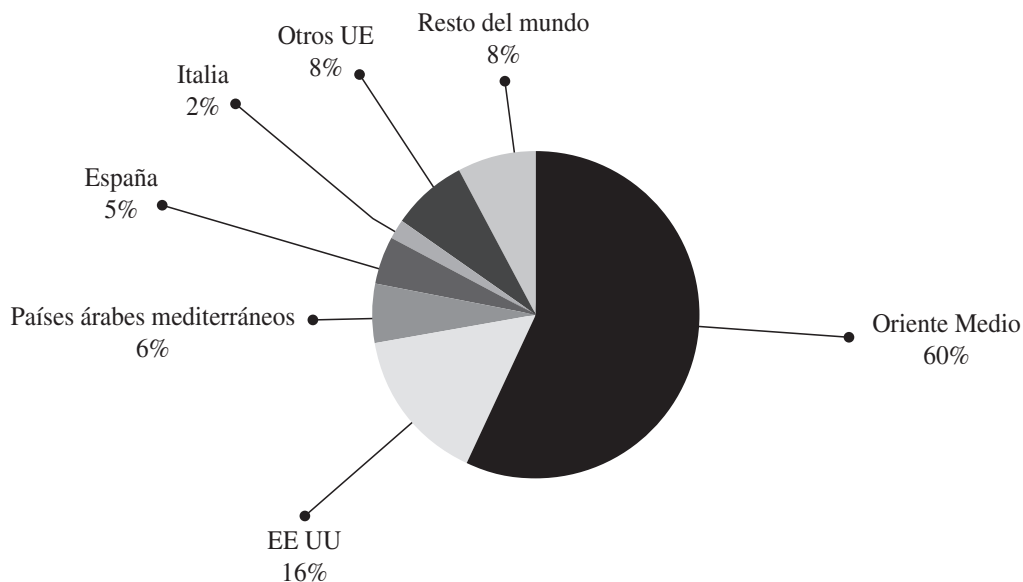
<sup>12</sup> Datos extraídos del documento de desalación de Hispagua (véase nota 1), que señala como fuente: Medina San Juan, J. A., La desalación en España: situación actual y perspectivas, dentro de la Conferencia Internacional: El Plan Hidrológico Nacional y la Gestión Sostenible del Agua. Aspectos Medioambientales, reutilización y desalación (<http://circe.cps.unizar.es/waterweb/index.html>). Se han completado estos datos con otros adicionales.

<sup>13</sup> Para más información, véase Esteban (2005) e Izaguirre (2004).

---

### Gráfico 1. Capacidad mundial de desalación

---



---

Fuente: Torres (2004)

---

provenía del mar. Esta cantidad ha sido suministrada por 10.350 plantas de capacidad mayor de 100 m<sup>3</sup>/día. Hay que destacar a España como el cuarto país productor de agua desalada del mundo, por detrás de Arabia Saudí, Emiratos Árabes y Estados Unidos.

Los estudios de mercado de Global Water Intelligence señalan unas inversiones previstas de 30.529 millones de dólares en nuevas plantas de desalación para el período 2005-2015, con un coste de operación de 3.416 millones de dólares. El 70% de la desalación será de agua de mar. En el arco mediterráneo se prevén unas inversiones de 9.600 millones de dólares, con unos costes de operación de 1.925 millones de dólares, de los que el 90% de la desalación será de agua de mar<sup>14</sup>.

#### B) Situación en España

La producción total de agua desalada en España en el año 2004 fue 1,4 hm<sup>3</sup>/día, duplicando la producción del año 2000. Esta cantidad ha sido producida por 900 plantas, la mayoría de reducido tamaño, que aportan del orden del 2% de los recursos hídricos disponibles, mientras que el agua reutilizada aporta el 1,25%. En su conjunto, la desalación

---

<sup>14</sup> Para más información, consúltese [www.idswater.com/Common/exhib\\_6/GWI\\_April.pdf](http://www.idswater.com/Common/exhib_6/GWI_April.pdf) o [www.globalwaterintel.com](http://www.globalwaterintel.com).

de agua de mar supone el 47,1% del agua total desalada, con 100 plantas en funcionamiento<sup>15</sup>; el resto corresponde a la desalación de aguas salobres procedentes de pozos y acuíferos. Existen 14 plantas con una capacidad superior a 20.000 m<sup>3</sup>/día.

En cuanto a su destino, el 55% del agua desalada se utiliza para uso doméstico, el 18,5% para uso industrial, el 3,6% para uso turístico y el 22,4% para uso agrícola.

El Programa AGUA del Ministerio de Medio Ambiente contempla, para el período 2004-2008, la construcción de 20 nuevas plantas de desalación (algunas de ellas son ampliación de plantas existentes), que aportarán algo más de 600 hm<sup>3</sup>/año.

Como un caso excepcional que demuestra la capacidad de las plantas de desalación para el abastecimiento de agua en España, hay que destacar a las islas Canarias, que tienen 253 plantas de desalación con una capacidad total de 315.000 m<sup>3</sup>/día, lo que supone el 25% del agua consumida en las islas (en el caso de Lanzarote y Fuerteventura el porcentaje de agua desalada es superior al 80%).

## 2.3 Procesos industriales de desalación de agua de mar por destilación

Los procesos de mayor implantación industrial para desalación de agua de mar son: destilación súbita multietapa, destilación multiefecto, compresión de vapor y ósmosis inversa. Existen otros procesos que no se comentarán, bien porque no se aplican a agua de mar, como la electrodiálisis, o bien por tener una capacidad de desalación muy pequeña, estar todavía en fase de investigación o tener una implantación comercial poco relevante, como es el caso de la destilación solar, la congelación y la destilación por membranas.

### A) Destilación súbita multietapa (MSF)

El proceso de destilación súbita multietapa se basa en calentar el agua de mar o salobre hasta una temperatura de 90 a 120 °C con vapor procedente de una fuente externa (generalmente una central de cogeneración) y conducirla hasta una zona a una presión inferior, en la cual se produce una evaporación súbita de agua destilada y una salmuera concentrada. El vapor de agua llega a un condensador donde se enfría con agua de mar entrante en la planta y se recoge en estado líquido. El agua de mar se calienta en el condensador, reduciéndose el consumo energético total del proceso. Si la salmuera se pasa sucesivamente a zonas de presión inferior, se sigue produciendo evaporación del agua. Este proceso se puede repetir en múltiples etapas (de 4 a 40).

---

<sup>15</sup> Datos de la Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR). <http://www.aedyr.com/>.

La principal ventaja del proceso MSF es su baja sensibilidad a la concentración inicial de sales del agua a tratar y a las partículas suspendidas, que se eliminan por un proceso simple de filtración, acompañado de la utilización de antiincrustantes y biocidas para prevenir la actividad microbológica.

El principal inconveniente de este sistema es el alto consumo energético (calor) que requiere. También presenta problemas de incrustaciones de compuestos insolubles (sales de calcio y magnesio) que se producen a más de 70 °C y que interfieren en la transferencia de calor. El alto poder corrosivo del agua de mar a temperaturas superiores a la citada es otro inconveniente que requiere su tratamiento previo.

La destilación súbita es el proceso más implantado en Oriente Medio, que cuenta con el 75% de la capacidad mundial instalada. La capacidad de las plantas mayores es 280.000 m<sup>3</sup>/día. Las principales empresas suministradoras de esta tecnología son de origen japonés, italiano y coreano.

### **B) Destilación multiefecto (MED)**

El proceso de destilación multiefecto evapora el agua de mar al ponerla en contacto con unos tubos por los que circula vapor generado por una fuente externa. En la siguiente etapa el vapor de agua se enfría y se condensa al intercambiar calor con la salmuera, una fracción de la cual se evapora. El agua que acaba de evaporarse pasa al siguiente “efecto”, donde se repite el proceso (entre 8 y 16 veces).

A diferencia del proceso MSF, la temperatura de trabajo baja a 70 °C, con lo que se reducen los problemas de incrustaciones y corrosión. Por otra parte, esta menor temperatura permite reducir el coste de inversión al posibilitar trabajar con materiales de inferiores prestaciones técnicas y de menor coste.

La tecnología MED es, con seguridad, la tecnología de destilación más prometedora en la actualidad, si bien se puede decir que su puesta de largo en cuanto a competitividad, comparada con el proceso MSF, ha sido reciente, con la construcción en Abu Dhabi de una planta de 240.000 m<sup>3</sup>/día (Blanco y Alarcón, 2004). Esta tecnología es de origen europeo y no tiene una gran implantación en el mercado. Los principales suministradores de plantas son Israel, Dinamarca, Francia e Italia.

### **C) Compresión de vapor (CV)**

El proceso de destilación por compresión de vapor está considerado como el proceso de destilación más eficiente. A semejanza del proceso anterior, el agua de mar se evapora en un intercambiador de calor, a causa del calor cedido por el vapor que circula por unos tubos. La diferencia está en que el agua evaporada pasa a un compresor, accionado por alguna fuente de energía externa (el proceso tiene distintas variantes en función de que



se utilice compresión mecánica, térmica o una bomba de vacío), que incrementa la presión y temperatura del vapor de agua que cede calor a la salmuera. El vapor se condensa y la salmuera pierde por evaporación otra fracción de agua sin sal que se conduce al compresor.

Las ventajas de este proceso están en un consumo energético menor que las anteriores alternativas por evaporación, aunque mayor que otros procesos de membranas, mayor compactidad que otros procesos de destilación y una baja temperatura de trabajo (65 °C), que reduce los problemas de corrosión y permite utilizar materiales de menor coste.

Este proceso se puede utilizar para capacidades desde 20 m<sup>3</sup>/día. El principal inconveniente es la capacidad máxima que admite, que está en 2.500 m<sup>3</sup>/día, debido a que el compresor resulta muy voluminoso (Loupassis, 2002:10-1). Los principales suministradores de estas plantas se localizan en Estados Unidos, Israel y Francia.

## 2.4 Procesos industriales de desalación de agua de mar con membranas

Una membrana está constituida por un material que permite la separación de los elementos que componen un fluido. Las membranas más ampliamente utilizadas son las semipermeables, donde el agua es la fase transferida preferentemente, por efecto de un gradiente de presión. Estas membranas se pueden clasificar en función de la medida de la molécula de soluto que son capaces de excluir, aunque a veces se hace referencia a la medida del poro de la membrana, dando así lugar a los procesos de nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración (Cantó y Luque, 2003), que pueden retener desde bacterias, virus, macromoléculas y compuestos orgánicos, hasta sales disueltas.

### Ósmosis inversa (OI)

Cuando por medio de una membrana semipermeable se separan dos compartimentos abiertos a la atmósfera, uno con agua pura y otro con una solución acuosa de sales, el agua pura atraviesa la membrana hacia la solución, aumentando la presión de la solución hasta alcanzar un valor (presión osmótica) suficientemente alto como para anular el caudal que atraviesa la membrana (Cantó y Luque, 2003). Si se aplica una presión a la solución acuosa concentrada, el proceso se invierte, pasando a través de la membrana semipermeable agua pura.

Los dos elementos fundamentales del proceso de ósmosis inversa son el sistema de presión y las membranas. La presión a aplicar depende del grado de salinidad de la solución, que en el caso de aguas salobres está en un rango de 17 a 27 bares, y en el caso de agua de mar va desde 55 hasta 82 bares (Loupassis, 2002:12-3). Sirva como ejemplo de orden de magnitud la presión de los neumáticos de un turismo, que es 2 bares.

El factor de conversión (relación entre el agua producto que atraviesa la membrana y la que entra en la membrana) también depende de la salinidad del agua y está entre el 90% y el 95% en el caso de aguas salobres y entre el 35% y el 50% para agua de mar (Semiat, 2001:2). El agua que no atraviesa la membrana tiene un contenido de sales muy superior a la de entrada a la misma.

Debido a la sensibilidad de las membranas ante los diferentes compuestos orgánicos y biológicos (algas y bacterias), se requiere de un proceso de pretratamiento bastante más riguroso que en los procesos de destilación, en los que hay eliminar el exceso de turbidez, sólidos en suspensión y ajustar el pH para que no las dañe. Por otro lado, las plantas de OI trabajan a 40 °C, por lo que los problemas de corrosión e incrustaciones quedan muy minimizados respecto a los procesos de destilación.

Además del sistema de bombeo a alta presión y las membranas, una planta de ósmosis inversa está constituida por una etapa de captación y bombeo del agua de mar a la planta de desalación, pretratamientos del agua, sistema de recuperación de energía de la salmuera que sale de las membranas, sistema de vertido de salmuera, tratamiento del agua producto desalada y almacenamiento.

Los sistemas de recuperación de energía de la salmuera que sale de las membranas a alta presión han dado un importante impulso a la implantación del proceso de ósmosis inversa, por la reducción del consumo energético de las plantas. Las turbinas Pelton permiten recuperar entre el 30% y el 45% de la energía aportada a las bombas de alta presión, y tienen un coste que se justifica cuando la salinidad del agua es muy alta y cuando la capacidad de la planta supera los 3.500 m<sup>3</sup>/día.

Las plantas de ósmosis inversa tienen la ventaja de ser modulares y fácilmente escalables, pudiéndose realizar aplicaciones desde 0,1 m<sup>3</sup>/día con un consumo de 15 kW/m<sup>3</sup>, hasta grandes plantas, como Carboneras, que tiene una capacidad de 120.000 m<sup>3</sup>/día y un consumo global de 4,25 kW/m<sup>3</sup>. Si se tratara de agua salobre, el consumo bajaría a una banda de 1 a 3 kW/m<sup>3</sup>. Los suministradores de estas plantas están muy repartidos por el mundo, aunque sobresalen Japón, Francia y Estados Unidos.

## 2.5 Calidad del agua desalada

Los procesos de destilación producen un agua con menor contenido de sales (0,02 g/l) que los procesos de ósmosis inversa (de 0,1 a 0,5 g/l). Hay otros parámetros, además del contenido de sales, que definen la calidad del agua (organolépticos, físico-químicos, sustancias no deseables, sustancias tóxicas, microbiológicos y radiactivos), que están regulados por la Unión Europea y por el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, en el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua para consumo humano.

Esta normativa introduce nuevos parámetros de control, de los que cabe destacar el contenido de los trihaluometanos (cloroformo, bromodiclora-metano, dibromocloro-metano y bromoformo). Su importancia radica en que el cloro se utiliza en los tratamientos de desinfección por su buen rendimiento y bajo coste, y también se utiliza como floculante para eliminar la materia orgánica en el pretratamiento con un filtrado posterior de arena y cartucho, antes de entrar en las membranas de ósmosis inversa. Estos compuestos del cloro reaccionan con parte de la materia orgánica (sustancias húmicas) y bromo contenidos en el agua de mar, formando los trihaluometanos. Para evitarlos, hay que realizar una serie de tratamientos destinados a eliminar o minimizar el contenido de cloro o sustituir los tratamientos con cloro por compuestos o tecnologías que desinfecten y eliminen la materia orgánica (Cortada *et al.*, 2004).

## 2.6 Aspectos medioambientales de la desalinización

Los aspectos de la desalación que tienen mayor impacto ambiental son el efecto de la salmuera sobre los organismos osmoconformadores, el incremento de la salinidad de los suelos regados con agua desalada por ósmosis inversa y la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, generado al producirse la energía que necesitan las plantas de desalación. Estos efectos se pueden minimizar con las tecnologías disponibles y las medidas correctoras adecuadas.

### A) Efectos de la salmuera

La salmuera de los procesos de ósmosis inversa tiene mayor concentración de sales (de 70 a 90 g/l) que la procedente de procesos de destilación (50 g/l); además puede portar restos químicos de los productos utilizados en los pretratamientos. Las afecciones de las desaladoras en Canarias, por ejemplo, debidas a las condiciones propias del clima marítimo en el Atlántico, son mínimas comparadas con las del Mediterráneo. El régimen de oleaje y la amplitud de las mareas hacen que la dilución del vertido de salmuera se realice en una superficie muy reducida, por lo que se asegura la nula influencia en la flora y en la fauna (Torres, 2004).

La salmuera tiene un gran impacto sobre los organismos osmoconformadores que no tienen capacidad de regulación osmótica de la concentración interna de sales, siendo ésta muy similar a la externa. Estas especies acaban desapareciendo en medios hipersalinos debido a la deshidratación de los tejidos. La fanerógama marina posidonia oceánica sufre estos efectos. Se trata de una especie protegida, de valor insustituible para otras especies, de distribución amplia y con una baja tasa de crecimiento y recuperación. Para preservarla, se intenta reducir los efectos de la salmuera diluyéndola antes de su vertido, mezclándola con otras aguas procedentes de ríos, canalizaciones o salida de refrigeración de centrales o conduciendo la salmuera, a través de emisarios (tuberías), a zonas marinas arenis-

cas sin vegetación, con hidrodinamismo medio o elevado que facilite su dilución (Sánchez Lizaso *et al.*, 2004).

### **B) Efecto del riego con agua desalada sobre el suelo**

El agua desalada que atraviesa las membranas de ósmosis inversa es muy corrosiva, por lo que hay que remineralizarla con carbonato cálcico antes de su uso y controlar las potenciales incrustaciones que pueda ocasionar en los goteros de riego<sup>16</sup>.

El rendimiento en la eliminación de sales empleando ósmosis inversa está entre el 94% y 99%, excepto para el boro, que sólo es del 67%. El sodio, si no hay un tratamiento posterior a la salida del agua de las membranas, puede causar con el paso de los años algunos daños para los suelos y cultivos, reduciendo la productividad de los mismos. Por ejemplo, la fresa, los cítricos, las hortalizas o la vid son poco tolerantes a la salinidad, mientras que la palmera o el trigo son bastante tolerantes. En el caso del boro también hay ciertos cultivos que son muy sensibles, como la vid, el manzano y el naranjo. Estos problemas son evitables regando por exceso, reduciendo la evapotranspiración del suelo con alguna cobertura o empleando, preferiblemente, el riego por goteo<sup>17</sup>.

### **C) Efecto de las emisiones de CO<sub>2</sub>**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la desalación provienen de la producción de energía eléctrica para alimentar las plantas de ósmosis inversa, o como consecuencia de la producción de vapor para alimentar las plantas de destilación. El impacto dependerá de la fuente de energía primaria que se utilice para la producción de dicha energía, que pueden ser combustibles fósiles con unas elevadas emisiones o, por el contrario, energía hidráulica, renovable o nuclear sin emisiones de CO<sub>2</sub>.

El consumo energético de las nuevas plantas previstas en el Programa AGUA para desalar 621 hm<sup>3</sup>/año equivaldría al 1,1% de toda la energía eléctrica producida en el año 2004 y, por lo tanto, sería achacable una emisión de CO<sub>2</sub> en el mismo porcentaje si la generación se realizara con el mismo *mix* de energías primarias<sup>18</sup>.

En las islas Canarias el 10% del consumo total de energía eléctrica se destina a procesos de desalación (632,5 GWh/año). En Fuerteventura este porcentaje llega al 58%. Las previsiones para el año 2012 son doblar la cantidad de agua desalada y, en consecuencia, la energía consumida (Hernández, 2000).

---

<sup>16</sup> Para mayor información, ver Hernández (2003).

<sup>17</sup> Para más información, ver Zarza (1999) y Hernández (2001a).

<sup>18</sup> Este párrafo se basa en el artículo de Juan María Sánchez, Las desaladoras y las emisiones de CO<sub>2</sub>, *Ambienta*, diciembre 2004, pero se utiliza un consumo energético de 4,5 en lugar de 3,5 y se compara el consumo con la energía eléctrica total generada en el año 2004, que fue 247.409 GWh.

## 2.7 El coste del agua desalada

Los costes totales de los procesos de desalación de agua se han ido reduciendo año tras año debido a la reducción de los costes de inversión y del consumo energético. Entre los factores que hay que destacar a la hora de elegir el proceso de desalación más adecuado están la capacidad de la planta, la salinidad del agua, la limpieza del agua y los costes de captación, los costes energéticos, los costes de vertido de la salmuera, la experiencia tecnológica, la cualificación de los recursos humanos y el plazo previsto de ejecución del proyecto.

La publicación de datos sobre los costes de desalación no tiene una base de cálculo unificada y hay importantes diferencias de criterio entre las diversas fuentes, que estriban en la capacidad de la planta, el año de construcción (las más modernas tienen menores costes de inversión y consumos), la unidad monetaria y el tipo de cambio euro-dólar, el período de amortización de la inversión, el coste de oportunidad, el coste de la energía, la inclusión o no de otros sistemas (captación, almacenamiento y vertido) y los efectos de ayudas financieras públicas.

Se han considerado para este estudio datos de fuentes publicados desde el año 2001<sup>19</sup>, con los que se ha elaborado el siguiente resumen de costes por procesos de desalación de agua de mar para el caso de una planta de tamaño grande. Los costes menores del rango de la tabla corresponden a los proyectos más recientes y a los de mayor capacidad. Si la planta fuera de tamaño pequeño o mediano, o no tuviera un buen diseño, la inversión y costes se pueden multiplicar por un factor de hasta 2,5. En el caso de aguas salobres, los costes de inversión y consumos del proceso de ósmosis inversa se pueden reducir a una tercera parte, pues dependen del grado de salinidad del agua<sup>20</sup>.

Como puede verse, el proceso de OI es el de menor inversión y consumo energético. Este consumo de energía para la desalación de agua de mar tiene una tendencia de 3 kWh/m<sup>3</sup> (1-1,5 kWh/m<sup>3</sup> para aguas salobres). El coste del agua desalada en el año 2000 era 0,5 €/m<sup>3</sup> para agua de mar (la mitad que en 1990), y la tendencia en 2005 es a mantenerse, ya que la disminución del consumo energético se compensa con el aumento del coste del kWh. Para aguas salobres el coste va de 0,25 a 0,35 €/m<sup>3</sup>.

---

<sup>19</sup> Para la realización de esta tabla se ha trabajado con datos procedentes de Semiat (2001), Torres (2004), Izaguirre (2003), Latorre (2004), Medina (2001), Hernández (2001b) y de Hispagua (ver nota 1), de la AEDyR (ver nota 4), Wangnick (2004) y FAO (2005).

<sup>20</sup> Resulta interesante comparar estos datos con la prospectiva realizada por el IPTS en el año 1996 sobre tecnologías de desalación, que preveía unos costes de inversión y unos consumos energéticos para el año 2015 que ya se han conseguido y superado en algunos casos en el año 2004 (Ribeiro, 1996:53).

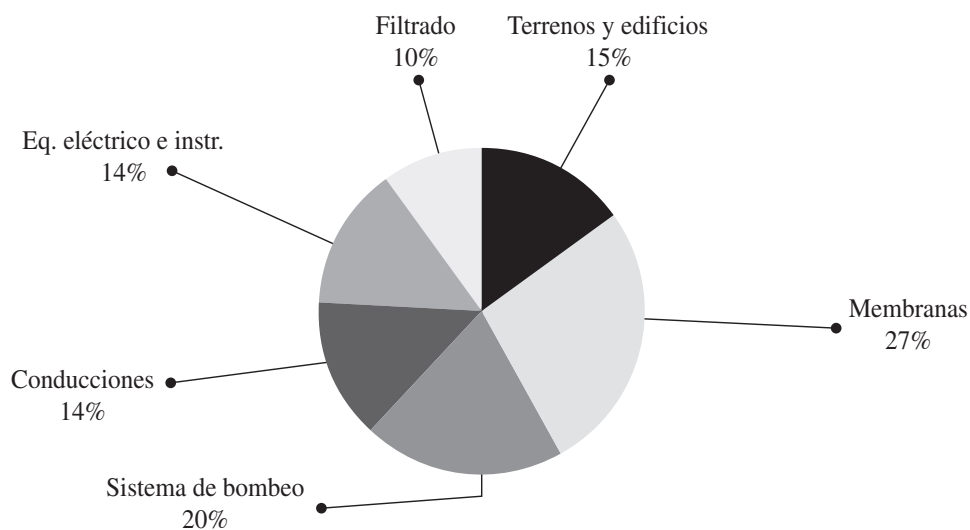
**Tabla 2. Procesos de desalación de mar: inversión, consumo energético y coste de producción**

Proceso (agua de mar)	Rango inversión (€/m <sup>3</sup> /día)	Rango consumo energía (kWheq <sup>21</sup> /m <sup>3</sup> )	Rango coste agua (€/m <sup>3</sup> )
OI	600 a 1.085	3 a 4,5	0,32 a 1,25
MED	750 a 1.000	6 a 9	0,65 a 1,25
MSF	1.000 a 1.500	10 a 14,5	0,92 a 1,25
CV (< 2.500 m <sup>3</sup> /día)	800 a 1.000	7 a 15	0,72 a 0,95

Fuente: Elaboración propia

Como ejemplo, la planta de Carboneras (2004)<sup>22</sup> tiene un consumo específico de 3,15 kWh/m<sup>3</sup>, y, si se añaden los costes de captación y tratamiento, el consumo global asciende a 4,25 kWh/m<sup>3</sup>. El coste del agua estará entre 0,42 y 0,45 €/m<sup>3</sup>. A continuación se muestra el desglose de la inversión (en %) de una planta de OI.

**Gráfico 2. Inversión de una planta de ósmosis inversa**



Fuente: Elaboración propia

<sup>21</sup> La unidad kWheq (kilovatio hora equivalente) es la suma del consumo de energía eléctrica y de la energía térmica (en los procesos donde se utiliza) convertida a kWh.

<sup>22</sup> La planta de Carboneras desala agua de mar con un contenido salino de 38 g/l con tecnología de ósmosis inversa en una etapa, con una tasa de conversión del 45%. Utiliza 12.096 membranas. El sistema de bombeo de alta presión (69 kg/cm<sup>2</sup>) tiene 1.500 kW de potencia y 950 m<sup>3</sup>/hora de caudal, absorbiendo una potencia de 2.050 kW. Recupera el 40% de la energía a través de una turbina Pelton conectada al eje de la bomba. Los datos de la planta se han obtenido de Batanero (2004), que da un consumo energético de 3,5 kWh/m<sup>3</sup>. Los datos publicados por *El País* el jueves 14 de julio de 2005 dan un consumo global de 4,25 kWh/m<sup>3</sup>.

La distribución de costes por m<sup>3</sup> de agua producido (en %) de un proceso de OI es la que se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3. Distribución de los costes de producción de aguas saladas por ósmosis inversa**

Concepto	% Coste
Energía	37-43
Amortización de la inversión	33-43
Operación y mantenimiento	8-16
Productos químicos	2-7
Reposición de membranas	2-5

Fuente: AEDyR

Lo cierto es que los costes del agua desalada pueden ser asumibles para el abastecimiento en ciudades desarrolladas y zonas turísticas, donde el precio fácilmente duplica el coste de desalación. El problema es mayor en lugares donde la agricultura es básica para la economía de la zona (Semiat, 2001).

Según el informe de la FAO sobre desalación de agua de mar para aplicaciones agrícolas (FAO, 2005), el agua desalada no es asequible para la mayoría de los cultivos, sólo lo es para los de mayor valor añadido. El agua desalada de menor coste es la de procedencia salobre y de plantas situadas en las proximidades del punto de consumo. Otra opción más recomendable es la reutilización de aguas residuales tratadas para fines agrícolas. Hasta la fecha, la aplicación del agua desalada a la agricultura se limita a cultivos de gran valor o a casos en los que el gobierno subvencione los gastos de inversión.

## 2.8 Tendencias tecnológicas

No hay duda de que las tecnologías de desalación, aparentemente maduras, están todavía ascendiendo en la curva de aprendizaje. Cada nuevo desarrollo reduce el coste, para lo que es fundamental la inversión en I+D. La clave está en invertir en nuevas plantas, incrementando la libre competencia entre productores y fomentando la cooperación con centros de investigación (Semiat, 2001).

Los nuevos desarrollos en desalación persiguen dos fines: por una parte, la reducción de costes y, por otra, la minimización del impacto ambiental. El primero ataca a los cuatro componentes principales del coste: la amortización de la inversión, el consumo energético, los pretratamientos y los costes de operación y mantenimiento.

## **A) Reducción de la inversión necesaria para las plantas de desalación**

En el futuro, unos diseños más compactos y la utilización de componentes estandarizados y fabricados con materiales de menor precio reducirán los costes de inversión y mantenimiento. Por otra parte, el desarrollo de economías de escala en un mercado globalizado permitirá aumentar la competencia entre los proveedores y reducir los costes de las plantas.

En las tecnologías de ósmosis inversa se ve una tendencia hacia el desarrollo de grandes membranas (18" x 61") para agua de mar, a semejanza de lo que está sucediendo para aguas salobres y nanofiltración. Las ventajas son el ahorro de espacio (tienen un área siete veces superior a las membranas actuales de 8" x 40"), el ahorro de costes de inversión, tanto de las membranas como de los elementos de tuberías, válvulas e instrumentación, así como un ahorro de costes de mantenimiento (Von Gottegerg y Lesan, 2005).

## **B) Reducción del consumo energético**

### **a) Recuperación de energía en sistemas de ósmosis inversa<sup>23</sup>**

En los sistemas de ósmosis inversa el consumo energético mínimo teórico para una conversión del 45% es de 1 kWh/m<sup>3</sup>, lo que todavía permite algunas mejoras respecto a los consumos actuales. El mayor consumo energético se produce en el bombeo a alta presión. Para reducirlo, se utilizan sistemas de recuperación de energía de la salmuera que sale de las membranas con una presión ligeramente inferior a la que tenía en la entrada. Los más empleados son turbinas Pelton, que recuperan entre el 30% y el 45% de la energía de bombeo del agua desalada que entra en las membranas. De este sistema no se esperan mejoras sustanciales y, sumando las mejoras de rendimiento en turbinas y bombas, sería difícil un ahorro superior a 0,2 kWh/m<sup>3</sup>.

Las tendencias tecnológicas van, a corto plazo, hacia la implantación de cámaras isobáricas para recuperación de energía, también denominadas conversores hidráulicos o cámaras hiperbáricas, que consisten en un circuito en el que, por medio de unas válvulas, se regula la entrada de la salmuera y del agua de mar, de modo que la salmuera transmite la presión al agua del mar y la dirige hacia las membranas, sin pasar por la bomba de alta presión. Una ventaja muy importante de este sistema es que permite reducir el tamaño de la bomba de alta presión (menor inversión), ya que el agua bombeada a las membranas se reduce a la mitad. Las pruebas realizadas utilizando cámaras isobáricas dan un rendimiento superior en un 20%-30% a las turbinas, lo que puede ocasionar un ahorro energético adicional de entre 0,4 y 0,5 kWh/m<sup>3</sup>, que permitiría llegar a consumos del proceso entre 2,5 y 3 kWh/m<sup>3</sup>.

---

<sup>23</sup> Los datos referentes a ahorro de kWh/m<sup>3</sup> han sido obtenidos por Torres (2004); los datos correspondientes a rendimiento de los equipos provienen de González (2004).



## **b) Aumento de la productividad y reducción de los costes de reposición de las membranas**

Desde el punto de vista científico, los mecanismos de transferencia de agua y expulsión de sal en las membranas de ósmosis inversa no se comprenden totalmente. Una mayor comprensión a nivel molecular permitirá llegar a nuevas membranas que podrían mostrar mayores flujos y un rechazo de sales mayor (Semiat, 2001), así como un menor ensuciamiento y, consecuentemente, una vida más larga. Los desarrollos futuros en el campo de las membranas irán en las siguientes líneas (Torres, 2004):

- Mayor productividad a menor presión de funcionamiento. Una bajada entre 6 y 7 kg/cm<sup>2</sup> en la presión de proceso supone una bajada de 0,35 kWh/m<sup>3</sup>.
- Mayor resistencia al cloro y otros oxidantes.
- Mayor resistencia al ensuciamiento producido por coloides.
- Mayor selectividad en el rechazo de boro e iones monovalentes.
- Menor rechazo de iones divalentes.
- Desarrollo de membranas de gran tamaño.

## **c) Plantas duales para sistemas MED**

Las tendencias en las tecnologías de desalación por destilación, de las que en España hay muy baja implantación, van hacia el desarrollo de esquemas integrados de generación energética y desalación, conocido como plantas duales, que presenta como ventaja la reducción de los costes energéticos, al aprovechar el calor residual de la planta de generación para la evaporación del agua de mar. El principal problema consiste en conjugar simultáneamente la demanda de energía eléctrica y de agua. En algunos países del Golfo Pérsico están unificadas la gestión eléctrica y la gestión del agua, por lo que se puede hacer una explotación global. Sin embargo, en la Unión Europea son mercados independientes, con sistemas de gestión y actores distintos, no vislumbrándose a medio plazo un cambio de modelo de gestión.

## **C) Reducción de los costes de los tratamientos previos del agua**

Para reducir el coste de los pretratamientos conviene utilizar un agua lo más limpia posible. La tendencia tecnológica va hacia el uso de membranas, gracias al abaratamiento que se está produciendo en ellas, lo que las hace competitivas con algunos pretratamientos químicos.

Existe alguna experiencia en la aplicación de la ultrafiltración en el pretratamiento de algunas plantas de desalación de agua de mar en Oriente Medio, obteniéndose unos índi-

ces de ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa más bajos que con los pretratamientos convencionales. Los costes de operación de estos pretratamientos oscilan entre 0,07 y 0,09 €/m<sup>3</sup> (Van Of *et al.*, 1999).

#### **D) Otras tendencias**

- Reducción de costes de operación y mantenimiento mediante el desarrollo de sistemas automáticos de control, con posibilidades de teleoperación y telemantenimiento, que agrupen en un centro de control la operativa de varias plantas de tamaño pequeño y medio.
- Minimización de los problemas ambientales asociados con el vertido de la salmuera mediante el desarrollo del concepto de descarga cero, y pretratamientos con aditivos naturales (Semiat, 2001).
- Desarrollo de nuevos modelos integrados de gestión y explotación de los recursos hídricos. El alto peso que tienen los costes de amortización de la inversión en el coste del agua desalada exige que las plantas estén funcionando continuamente. Además, cuando el período de parada es prolongado (meses), las membranas pueden quedar seriamente afectadas, hasta el extremo de que haya que proceder a su sustitución (Izaguirre, 2004).

## **2.9 Capacidad tecnológica de España en el campo de la desalinización**

España es el cuarto país a escala mundial por capacidad de desalación de agua. Las islas Canarias se han constituido en un referente en este campo, siendo un escaparate de las diferentes tecnologías disponibles. La península ha iniciado su camino algo más tarde, pero con gran fuerza. Una muestra del reconocimiento internacional ha sido el nombramiento, en el año 2005, del español D. José A. Medina San Juan como presidente de la Asociación Internacional de Desalación.

En el mercado nacional de desalación, dominado por la tecnología de ósmosis inversa, compiten grandes empresas de los sectores de la construcción, algunas de las cuales tienen filiales especializadas en tratamiento de aguas y medio ambiente, y del sector de ingeniería, que realizan el proyecto y subcontratan la compra de equipos y componentes. Cabe destacar a las empresas Abengoa, Inima-OHL, ACS, Cadagua-Ferrovial, Sacyr, Aquali-FCC y Pridesa-Acciona.

Sin lugar a dudas, las empresas españolas están en muy buena posición como ingeniería y gestores de proyectos, y como construcción civil e instalaciones. Pero en el sector de equipos y componentes (membranas), predominan multinacionales con capital mayoritariamente extranjero.

En el área de la investigación básica y aplicada hay una importante capacidad tecnológica en los centros de investigación nacionales, que participan en proyectos internacionales de investigación y desarrollo tecnológico. Cabe destacar a la Universidad de las Palmas, la Universidad de Alicante, la Universidad de Zaragoza, la Universidad de Cádiz, CEDEX, CIEMAT y el Instituto Tecnológico de Canarias.

## 3. Las energías renovables

### 3.1 Evolución histórica

Las energías renovables se pueden clasificar, según su procedencia, en biomasa, biocombustibles, hidráulica, eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica y marina (mareas y olas). Su duración está unida a la vida de nuestro planeta y su disponibilidad no es controlable por el ser humano, ya que depende de las condiciones climáticas, que son factores externos a la demanda. Por otra parte, las fuentes de energía primaria no renovable o convencionales son el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear, cuya duración depende del agotamiento de las materias primas.

Por cuestiones de extensión del artículo, sólo se va a presentar la evolución de las energías renovables de tipo solar y de tipo eólico<sup>24</sup>. Su aprovechamiento por parte de la humanidad se remonta a varios miles de años a.C., con el uso de espejos curvados que concentraban la radiación solar para iniciar un fuego o con la utilización de velas para navegar. Aunque parezca extraño, las crisis energéticas por la escasez de combustibles se han sucedido desde el siglo V a.C. en Grecia, lo que ha impulsado desde entonces el desarrollo de tecnologías de explotación de recursos renovables. Estas etapas de desarrollo sostenible han estado seguidas de períodos de olvido, cuando se ha encontrado otra fuente energética de bajo coste y de mayor eficiencia. La última crisis energética importante ha sido la del petróleo en el período entre 1973 y 1979.

Sin lugar a dudas, se puede considerar a la segunda mitad de los siglos XIX y XX como las épocas de mayor ruptura y avance tecnológico en las energías renovables, derivadas del desarrollo de la electrotecnia y la electrónica, potenciada con el desarrollo de las tecnologías de los materiales y la aerodinámica.

Simplificando muchísimo la historia de estas energías, cabría destacar el desarrollo de los molinos de viento en los siglos XII y XIII para producir energía mecánica, y habría

---

<sup>24</sup> Para la evolución histórica de la energía eólica, resulta instructivo consultar en <http://www.winpower.org> la evolución de energía solar en el artículo Una brevísima historia de la arquitectura solar, de Mariano Vazquez Espí, que se podrá encontrar en <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n9/amvaz.html>, y una breve reseña histórica de la energía fotovoltaica en <http://www.todosolar.com> o en <http://news.soliclima.com>.

que esperar hasta finales del siglo XIX para que el americano Brush generara electricidad (12 kW en corriente continua). En Europa, La Cour inició el desarrollo eólico, y posteriormente Juul, en los años cincuenta, logró generar corriente alterna. Los avances se han ido sucediendo hasta conseguir potencias del orden del megavatio.

En el desarrollo de la energía solar térmica se puede distinguir una primera etapa basada en la concentración de la energía con espejos. Hasta el siglo XVIII no se puede hablar de captador plano o cajas calientes solares, inventadas por Saussure, que se basan en la capacidad del vidrio para retener calor. En paralelo a este descubrimiento se desarrollaba la óptica como una rama de la física, llegando a conseguir Lavoisier fundir platino con un sistema de lentes que concentran la radiación. En el siglo XIX, Mouchot inventó la primera máquina solar con reflectores cónicos, que fue perfeccionada posteriormente por otros técnicos, aunque la comercialización tuvo poco éxito.

Un cambio significativo en el aprovechamiento de la energía solar llegó con el descubrimiento del efecto fotovoltaico por Becquerel en el siglo XIX, estudiado por Hertz en los sólidos y con el que Einstein obtuvo el premio Nobel en 1921. Los años cincuenta supusieron el despegue tecnológico de las celdas fotovoltaicas con el desarrollo de los semiconductores, que en 1958 fueron aplicadas al satélite Vanguard para suministrar energía. Desde entonces, se han ido produciendo mejoras de eficiencia muy significativas.

En España cabe destacar dos hitos significativos en la implantación de las energías eólica y fotovoltaica, que se producen en los años ochenta con la instalación de los primeros aerogeneradores en Tarifa y la Plataforma Solar de Almería. Desde entonces, en 30 años, se ha generado en nuestro país un tejido industrial bastante sólido. En la actualidad, desde el punto de vista comercial, la energía eólica es mucho más competitiva que la energía solar, que se encuentra todavía en fase de investigación para suministrar potencias elevadas, tanto por la necesidad de espacio y la inversión requerida por unidad de potencia, como por el rendimiento energético de las plantas.

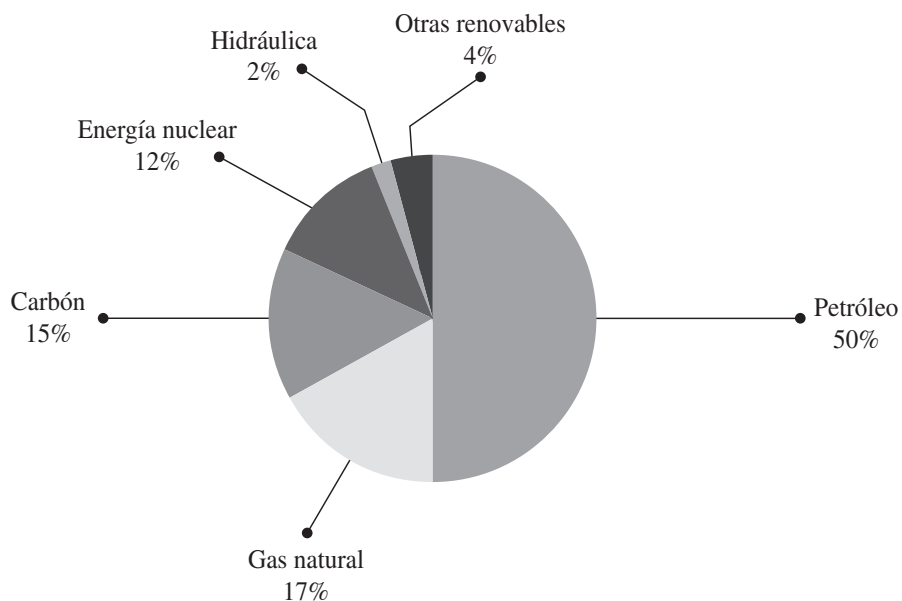
### **3.2 La importancia de las energías renovables entre las fuentes de energía primaria**

Todavía hoy una cuarta parte de la población en el mundo no tiene acceso a la electricidad. El 80% de las personas sin electricidad vive en zonas rurales, principalmente en el sur de Asia y en África Subsahariana. Las energías renovables pueden ser una opción para estas zonas aisladas de la red eléctrica<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> World Energy Outlook 2002, Energy & Poverty, International Energy Agency.

### Gráfico 3. Consumo de energía primaria en España



Fuente: MITYC (2005)

En aras a la claridad, en este estudio se realizan las conversiones de las distintas unidades de energía a toneladas equivalentes de petróleo (tep). El consumo mundial de energía primaria en el año 2000 alcanzó los 9.980.000 ktep. Los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) constituyeron el 81% de la energía consumida<sup>26</sup>, mientras que las energías renovables tuvieron un peso del 13%<sup>27</sup>.

En España, el consumo de energía primaria en el año 2004 fue de 142.056 ktep, un 4,1% más que en el año 2003. El grado de autoabastecimiento de energía primaria fue del 23%, que corresponde a la totalidad de la energía nuclear y de la energía renovable y a una tercera parte del carbón consumido<sup>28</sup> (Gráfico 3).

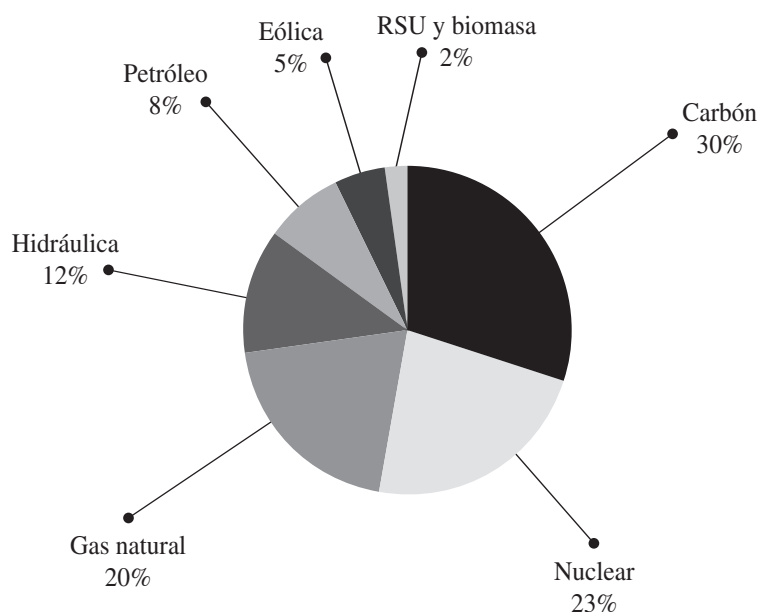
La energía primaria se procesa y se transforma para obtener productos derivados del petróleo (gasolina, gasóleo, fueloil), distintas fracciones de gas (butano, propano, etc.) y electricidad. Estas energías finales son consumidas por la industria (36%), el transporte (36%) y resto de usos (28%).

<sup>26</sup> Véase Rivero (2004) y Birol (2005).

<sup>27</sup> Véase EREC (2004).

<sup>28</sup> Véase el informe de la Energía en España 2004, elaborado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

### Gráfico 4. Generación eléctrica en España



Fuente: MITYC (2005)

Dado que las plantas de desalación por ósmosis inversa necesitan energía eléctrica, se dedica una mayor atención a este sistema de generación, que produjo un total de 261.108 GWh en España en el año 2004, con una potencia instalada de 70.003 MW<sup>29</sup>. En relación con los siguientes gráficos sobre la potencia instalada en el sistema eléctrico y la energía generada atendiendo a la fuente de energía primaria, es interesante diferenciar las centrales que funcionan de forma continua, como las nucleares y las de carbón, de aquéllas que operan discontinuamente por la indisponibilidad de energía primaria (energías renovables), o porque atienden sólo los picos de demanda de energía. La energía nuclear, con un 9% de la potencia total instalada, genera el 23% de la energía eléctrica; y en el lado opuesto, la energía eólica, con una potencia instalada similar, sólo genera el 5% de la energía eléctrica (Gráfico 4).

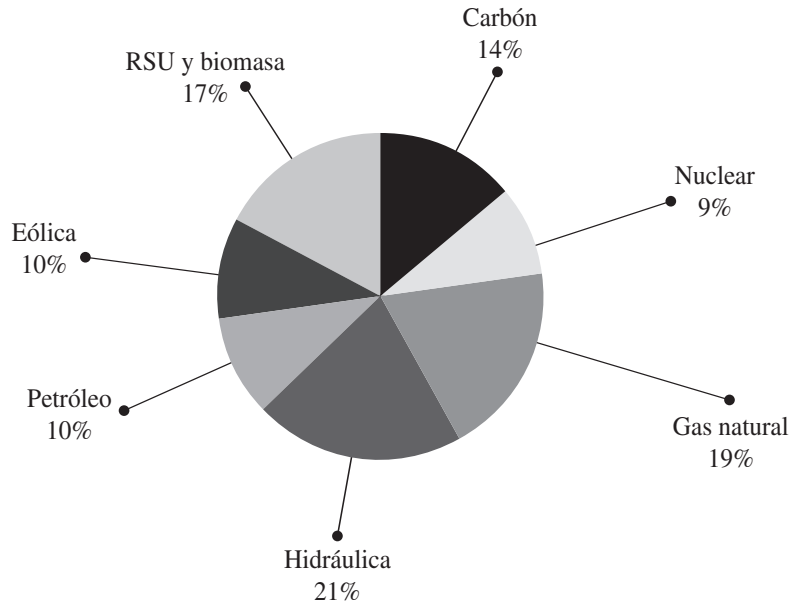
Las plantas de generación tienen unos factores de escala que resultan clave a la hora de estudiar la viabilidad económica de un tipo de energía frente a otra. En la Tabla 4 (p. 33) se muestran las dimensiones típicas de una planta de generación eléctrica, la inversión media que necesita (Vivar, 2004) y la contribución a la generación de energía de cada tipo de central, en número de horas equivalentes (funcionamiento a la potencia nominal de la

<sup>29</sup> La potencia es un término que indica la energía que se podría generar por unidad de tiempo. La energía que se genera depende del número de horas de funcionamiento y de la potencia instantánea de la planta.

---

### Gráfico 5. Potencia eléctrica en España

---



---

Fuente: MITYC (2005)

---

planta)<sup>30</sup>. Por ejemplo, una única central nuclear podría generar en una hora 1.300.000 kWh de energía y estar operativa 8.075 horas al año, mientras que un aerogenerador de última generación podría generar cada hora 2.000 kWh a la máxima capacidad y estar operativo unas 2.000 horas equivalentes al año, lo que implica que para generar la misma energía que una central nuclear serían necesarios 2.600 aerogeneradores.

La disponibilidad de energía primaria para atender la demanda es una diferencia fundamental entre las energías convencionales y las energías renovables. Una central de tipo renovable, por ejemplo, no podrá generar si en ese momento no hay viento para mover las palas de un aerogenerador; o si fuera de noche no se podría producir energía fotovoltaica y, por lo tanto, el número de horas efectivas en funcionamiento será inferior a una central de tipo convencional, que cuenta con almacenamiento de energía primaria (carbón, petróleo o gas) para cuando se necesite. Hay que señalar que la energía eléctrica de la red no se puede almacenar en grandes cantidades y, por lo tanto, se produce según se demanda.

---

<sup>30</sup> Datos calculados a partir del informe del Ministerio de Industria Turismo y Comercio (2005), La Energía en España, 2004.



**Tabla 4. Centrales eléctricas: tecnología, potencia, inversión y disponibilidad**

Tecnología	Potencia instalada tipo (kW)	Inversión media (€/kW)	N.º horas efectivas anuales
Nuclear	1.300.000	2.100	8.075
Carbón	500.000	850	6.580
Ciclo combinado gas	400.000	400	3.516
Turbina de gas	100.000	300	3.516
Minihidráulica	10.000	1.200	1.880
Eólica	(por cada máquina) 2.000	900	1.890
Solar fotovoltaica	(por cada m <sup>2</sup> de panel) 0,15	6.000	1.500
Solar termoeléctrica	(proyectos en construcción)	2.700	2.500

Fuente: UNESA, VGB, EUROELECTRIC y MITYC

### 3.3 Perspectivas futuras

Si el actual modelo energético se mantiene a grandes rasgos, se estima que en el año 2030 el consumo mundial de energía será de 17.065.000 ktep<sup>31</sup>, duplicando el consumo del año 2000, y que aumente aún más la dependencia de los combustibles fósiles hasta llegar al 87% de la energía primaria consumida. También se esperan importantes crecimientos del consumo de energías solar y eólica. Los expertos convienen en que este modelo de desarrollo no es sostenible, puesto que las reservas de petróleo durarán 34 años con la producción equivalente al año 2001, las de gas durarán 77 años al nivel de producción del año 2000 y las reservas de carbón 200 años con la producción del año 2000<sup>32</sup>, siempre y cuando la escasez no eleve los precios y haga rentable la exploración y explotación de nuevos yacimientos.

Centrándonos en la UE, y concretamente en la generación eléctrica, se prevé un estancamiento de la generación hidráulica y nuclear, un incremento importante de la generación térmica por gas natural y un crecimiento exponencial de las energías renovables (Vivar, 2004).

En España, el nuevo Plan de Fomento de las Energías Renovables 2005-2010, aprobado el 26 de agosto de 2005, tiene como objetivo cubrir con generación de origen renovable el 12,1% de la demanda total de energía primaria en España en el año 2010, el doble que en 2004, y

<sup>31</sup> Se ha realizado con unas expectativas de crecimiento del 1,8% anual, supuesto que la población crezca un 1% anual y el PIB un 3% anual. Para más información, véase Rivero (2004).

<sup>32</sup> Para más información, véase Rivero (2004).

contribuir al 30,3% de la generación eléctrica. Cabe subrayar el crecimiento previsto otorgado a la energía eólica, que sería del 250% de la potencia instalada actualmente.

Un caso excepcional en el desarrollo de las energías renovables es la Comunidad Foral de Navarra, que se espera que haya alcanzado el 70% del consumo eléctrico de la región en el año 2005<sup>33</sup>.

### 3.4 Tipos de energías renovables de mayor potencial en el campo de la desalinización

Con la puesta en marcha de las desaladoras previstas en el Programa AGUA para obtener 600 hm<sup>3</sup>/año, supuesto un consumo energético de 4,5 kWh/m<sup>3</sup>, se consumirá un total de 2.700 GWh de energía eléctrica, que podrían ser generados con energía primaria convencional (un tercio de la energía generada en un año por una central nuclear de 1.300 MW o toda la energía generada por una central de carbón de 500 MW) o con energía primaria renovable (700 aerogeneradores de 2 MW). Se describen a continuación los tres sistemas de generación de energía renovable que, *a priori*, resultan los más idóneos para la alimentación de plantas de desalación de tamaño pequeño y mediano, que son la eólica, la solar térmica y la solar fotovoltaica. De ellos, la energía eólica es el sistema más apropiado cuando hay requisitos más elevados de potencia, que sería el caso de las plantas de mediana capacidad de desalación. La energía solar tiene aplicación para plantas de pequeña potencia, pero con un coste muy elevado. Para plantas de gran capacidad de producción, la extensión de terreno que se necesita para implantar cualquier tipo de energía renovable, eólica o solar, no hace viable el uso de estas tecnologías, si se dispone de otro tipo de centrales de generación de tipo convencional más compactas.

#### A) Energía eólica

Un aerogenerador es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica y eléctrica. La configuración más típica son tres palas movidas por el viento, situadas en una góndola en lo alto de una torre, que giran alrededor de un eje que acciona un generador eléctrico. La adecuación de las distintas velocidades de giro de los componentes se realiza por medios mecánicos o magnéticos. Estos aerogeneradores se agrupan en los denominados parques eólicos, que pueden estar en tierra (próximos o lejanos a la costa) (*on-shore*) o en el mar (*off-shore*) anclados al fondo con pilares, a una profundidad máxima de 20 metros, no existiendo implantación reseñable de esta última tecnología en España.

---

<sup>33</sup> Para más información, véase el artículo de la Fundación para el Desarrollo Sustentable, Navarra cubrirá el 70% de su consumo eléctrico mediante energías renovables, abril de 2005. <http://www.fundacionsustentable.org/>.

La potencia eólica de los aerogeneradores comerciales de mayor potencia llega a 2.000 kW, si bien existe algún desarrollo de más de 3.000 kW. En los últimos años se ha pasado de una inversión de 1.500 €/kW a 900 €/kW<sup>34</sup>.

La potencia eólica en España en el año 2004 era de 8.263 MW, la mitad de la instalada en Alemania. Entre ambos países instalaron el 70% de la potencia eólica nueva implantada en 2004, si bien Dinamarca es el país europeo que presenta las mayores *ratios* de densidad de potencia instalada por superficie del país y por población. Las *ratios* en España son de 191 kW de potencia por cada 1.000 habitantes (similar al alemán) y 16 kW por km<sup>2</sup> de superficie. La mayor *ratio* la tiene la Comunidad Foral de Navarra, con 1.400 kW por cada 1.000 habitantes y 86 kW por km<sup>2</sup> de superficie<sup>35</sup>.

Se estima que España tiene un potencial eólico técnicamente aprovechable de 43.000 MW (Villanueva e Hidalgo, 2003), y que los recursos eólicos disponibles y técnicamente aprovechables en el mundo (53.000 TWh/año) podrían cubrir más del doble de la demanda total de electricidad en 2020.

## B) Energía solar térmica

Un sistema de generación térmica está constituido por un conjunto de colectores o captadores de radiación solar que calientan un fluido, el cual transfiere el calor a un segundo fluido que se almacena en un acumulador. La principal aplicación de la energía térmica es la producción de agua caliente sanitaria de uso residencial.

En el caso de la generación termoeléctrica de torre, una serie de espejos reflejan y concentran la radiación solar sobre una zona en la parte alta de la torre, por la que circula un fluido que se calienta y se conduce a una turbina que se une mecánicamente a un generador eléctrico. Actualmente no hay en España ninguna central de este tipo en operación.

El rendimiento energético de los captadores solares depende, evidentemente, de la radiación solar recibida. En España va desde los 300 kWh/m<sup>2</sup>/año de Bilbao hasta los 850 kWh/m<sup>2</sup>/año de Huelva<sup>36</sup>.

En el año 2003, España contaba con 700.433 m<sup>2</sup> de paneles de energía solar térmica, con una densidad media de 16 m<sup>2</sup> de paneles por cada 1.000 habitantes y de 1,39 m<sup>2</sup> de paneles por km<sup>2</sup> de superficie. Hay que destacar a las islas Baleares, que cuentan con 82 m<sup>2</sup> de paneles por cada 1.000 habitantes, o 15,7 m<sup>2</sup> por km<sup>2</sup> de superficie, seguidas de las islas Canarias y

---

<sup>34</sup> Según la Asociación de Productores de Energías Renovables, el 75% de estos costes corresponde al coste de la máquina, el 10% a obra civil, el 10% al sistema eléctrico y el 5% a ingeniería.

<sup>35</sup> *Ratios* de elaboración propia a partir de los datos obtenidos del IDAE y del INE.

<sup>36</sup> Datos obtenidos de Daniel González, Sistemas de Energía Solar, Avances Tecnológicos y Nuevas Aplicaciones, Aguasol Ingeniería.

Andalucía<sup>37</sup>. Si comparamos estas cifras con las de algunos países europeos mediterráneos y centroeuropeos avanzados en el campo de las energías renovables, España no se encuentra en una posición destacada, a pesar de sus favorables condiciones climáticas. Si tuviéramos una ratio media semejante a la media de los tres principales países (Austria, Grecia y Alemania tienen 220 m<sup>2</sup>/1.000 habitantes y 23 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> de superficie), la implantación en España debería ser del orden de 10 millones de m<sup>2</sup> (10 km<sup>2</sup>), lo que podría producir una energía equivalente a 6.000 GWh/año, que supondría el 2,3% de la energía eléctrica consumida en el año 2004.

### C) Energía solar fotovoltaica

Un sistema de generación solar fotovoltaico se basa en la propiedad de algunos materiales de emitir electrones cuando reciben radiación solar (fotones). Estos elementos se agrupan en células y paneles y proporcionan una tensión continua que necesita de un inversor para convertirla en alterna. Las aplicaciones son de baja potencia: edificios, servicios de auxilio y transmisión de información en zonas aisladas, etc. El rendimiento energético es muy bajo: en torno al 15%.

La potencia fotovoltaica instalada en el mundo en el año 2004 era de 1.256 MW, con un crecimiento del 67% respecto al 2003<sup>38</sup>. Alemania es el primer mercado mundial fotovoltaico, por delante de Japón y Estados Unidos. La mayor planta solar del mundo (Baviera Solarpark) se ha inaugurado en el año 2005 en Alemania, con una potencia de 10 MW, ocupa 250.000 m<sup>2</sup> y tiene 57.600 paneles solares<sup>39</sup>.

Según el MITYC, a finales de 2004 había instalada en España una potencia de 37 MW, que supone el 7% de la potencia instalada en Alemania, pese a que recibe una radiación mayor (más de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>). Sin embargo, somos el país líder europeo en fabricación de paneles solares, con una cuota del 35% del mercado europeo y del 9% del mercado mundial (Villanueva e Hidalgo, 2003). El nuevo Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2005-2010 hace una apuesta muy importante para aumentar la potencia a 400 MW al final del período.

La densidad de potencia instalada en España<sup>40</sup> es de 0,84 kW por cada 1.000 habitantes y 0,07 kW/km<sup>2</sup> de superficie, siendo Navarra la comunidad autónoma con mayores densidades (9,3 kW/mil habitantes y 0,56 kW/km<sup>2</sup>). Si toda España tuviera la media de Navarra, habría una potencia de 400 MW, atendiendo al parámetro de población, que coincide con el objetivo del Plan Nacional de Energías Renovables, y de 300 MW, atendiendo al parámetro de superficie.

---

<sup>37</sup> Ratios de elaboración propia a partir de los datos obtenidos del IDAE y del INE.

<sup>38</sup> Michael Schmele, *Photon Internacional*, marzo 2005.

<sup>39</sup> Se podrá encontrar más información en <http://www.eramac.org>; <http://www.powerlight.com>.

<sup>40</sup> Ratios de elaboración propia a partir de los datos obtenidos del IDAE y del INE.

Si se compararan las densidades con otros países europeos, Alemania tiene unas densidades de 9,62 kWp/1.000 habitantes y 2,22 kWp/km<sup>2</sup>, seguida de Países Bajos (4,61 kWp/1.000 habitantes y 2,22 kWp/km<sup>2</sup>) y Austria (2,46 kWp/1.000 habitantes y 0,24 kWp/km<sup>2</sup>), países con menor radiación solar que España.

### 3.5 Aspectos medioambientales de las energías renovables

Las previsiones mundiales de duplicar el consumo de energía primaria en el horizonte 2000-2030 implican que las emisiones de CO<sub>2</sub> también se duplicarán si se mantiene el mismo sistema de generación, pasando de 23.781 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> generadas en el 2000 a 44.497 millones de toneladas previstas en 2030 (Rivero, 2004).

En España, las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a la producción de energía eléctrica son el 17% de las emisiones totales. El resto de combustibles fósiles son consumidos en transporte (46%), industria (24%) y uso residencial (13%) (Sánchez, 2004). El Plan Nacional de Asignaciones establece los derechos de emisión de CO<sub>2</sub> por sectores para el cumplimiento del protocolo de Kioto.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducirán con el nuevo Plan de Energías Renovables 2005-2010, pero la cuantía dependerá del tipo de fuente de energía primaria que sustituyan. A continuación se muestra una tabla con la cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> para los distintos tipos de centrales de generación eléctrica (Vivar, 2004).

**Tabla 5. Centrales eléctricas: emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de central**

Planta de generación eléctrica	Emisiones de CO <sub>2</sub> en kg/kWh
Carbón	0,8 a 1,2
Petróleo	0,76
Gas natural	0,36 a 0,58
Nuclear	0,02
Hidráulica	0,005
Fotovoltaica	0
Eólica	0

Fuente: Vivar (2004)

Se podrían reducir las emisiones a la mitad con una mejora de la eficiencia energética en el uso final (58% de la reducción de emisiones), el incremento de la generación con energías renovables (20% de la reducción) y nuclear (10% de la reducción), el cambio de

combustible en usuarios finales (7% de la reducción) y cambios en la generación mixta de combustibles fósiles (Biol, 2005).

### 3.6 El coste de las energías renovables

La compraventa de energía está regulada en España por el Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, que establece la metodología del régimen jurídico y económico de la generación eléctrica en régimen especial, otorgando unas ventajas en las tarifas reguladas para las energías renovables. Además de la tarifa regulada, se puede acceder al mercado libre, recibiendo en este caso, además del precio de mercado, un incentivo por participar, más una prima<sup>41</sup>.

La tarifa media de referencia en el año 2005 fue 0,073 €/kWh. Los precios regulados de adquisición de la energía eran: para la energía de origen eólico, 0,066€/kW (90% de la tarifa), y para la energía de origen fotovoltaico (potencia menor de 100 kW), 0,42 €/kW (575% de la tarifa)<sup>42</sup>.

Por otra parte, existen ayudas financieras para incentivar la implantación de estas tecnologías, tipo subvención o créditos blandos, otorgadas por el IDAE, ICO y las comunidades autónomas. A efectos de este artículo, a la hora de estipular los costes de las energías renovables, se partirá de la hipótesis de que la inversión es realizada en su totalidad por el promotor, sin recibir ninguna ayuda pública, por lo que, en el caso de que el proyecto cuente con alguna ayuda financiera, mejoraría su rentabilidad.

El coste de generación utilizando viento o energía solar corresponde, básicamente, a la amortización de la inversión, costes de oportunidad y financieros. Los costes de generación de electricidad con energías renovables todavía son superiores a los de generación con energías convencionales. La que está en un estado más próximo para ser competitiva es la energía eólica. La energía solar fotovoltaica tiene unos costes seis veces superiores a la eólica y la solar termoeléctrica está en fase de demostración. La Tabla 6 muestra una estructura de costes típica para generación de energía renovable, y se compara con el precio de venta de la misma en el mercado regulado.

En España los precios de venta de la energía al consumidor final también están regulados y dependen del tipo de uso (doméstico o industrial), tipo de tarifa y potencia. Los costes del kWh que se utilizan en los estudios de desalación para grandes plantas corresponden

---

<sup>41</sup> Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, que establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

<sup>42</sup> Fuente: Asociación de Productores de Energías Renovables, <http://www.appa.es/espana/04espana3.htm>.

**Tabla 6. Coste de generación de energía de origen renovable, por tecnologías**

	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Solar térmica baja temperatura ACS*
Inversión (€/kW)	900	6.000	2.700	1.000
Horas efectivas de funcionamiento	1.890	1.500	2.500	2.500
Período amortización (años)	20	20	20	20
Coste amortización (€/kWh)	0,024	0,200	0,054	0,020
Coste operación y mantenimiento (€/kWh)	0,014	0,014	0,014	0,014
Coste de capital 5% (€/kWh)	0,014	0,121	0,033	0,012
Total costes (€/kWh)	0,053	0,335	0,101	0,046
Precio venta regulado (€/kWh)	0,066 (<15 años); 0,058 (>15 años)	0,42	0,22	–

\* Para producción de calor (no de electricidad). Datos en unidades equivalentes.

Fuente: Elaboración propia

a un precio de 0,0485 €/kWh, que es inferior al coste de generación de la energía si se utilizara una fuente primaria renovable.

### 3.7 Tendencias tecnológicas

La política energética europea pretende mantener un equilibrio entre la competitividad económica de la industria, el respeto al medio ambiente y la seguridad y calidad del suministro energético. Para ello, conjuga el desarrollo de tecnologías limpias, basadas en combustibles convencionales, con el desarrollo de las tecnologías renovables.

El Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) identificó en el estudio Energía: Tendencias a Medio y Largo Plazo, dos macro-tendencias tecnológicas de las energías renovables, a saber, la reducción de costes y el almacenamiento de energía.

#### A) Reducción de costes

La energía eólica todavía necesita reducir el coste del kWh generado en un 30% para ser plenamente competitiva con la generación a partir de combustibles fósiles (Thresher, 2005). En un horizonte del año 2009 se prevé el desarrollo de aerogeneradores multimegavatio, la reducción de los costes de fabricación de 300 a 200 €/kW, la eliminación de la caja de multiplicación para reducir el mantenimiento, la mejora del comportamiento

de las máquinas en sistemas aislados y redes débiles, y la utilización de generadores eléctricos sumergidos.

Para aumentar el número de horas de funcionamiento de los equipos, la generación eólica en el mar muestra un gran potencial por la mayor regularidad y velocidad del viento, aunque también los costes son superiores a la generación en tierra, debido a la complejidad de la instalación y a las condiciones ambientales (olas, tormentas y corrosión). El mar también resulta un lugar idóneo para instalar grandes máquinas multimegavatio (Thresher, 2005). Existen equipos cimentados en profundidades de hasta 20 metros, pero no en aguas profundas (más de 30 metros), siendo una alternativa ir hacia plataformas flotantes. En España existen algunas iniciativas destinadas al desarrollo de generación de energía eólica sobre plataformas marinas, actualmente en proyecto<sup>43</sup>.

El programa de investigación eólica del Department of Energy (DoE) de Estados Unidos está evaluando distintos métodos de plataformas flotantes para generación eólica, con máquinas multimegavatio en el mar para profundidades entre 50 y 200 metros. Otro de los objetivos del programa eólico es reducir el coste de 4-6 c\$/kWh a 3 c\$/kWh para plantas en tierra y lugares con baja velocidad de viento (21 km/h a 10 m de altura) y a 5 c\$/kWh para plataformas eólicas marinas (Thresher, 2005). Por su parte, el Plan danés Energía 21 tiene por objetivo implantar 4.000 MW de energía eólica marina en profundidades de 15 m, que generará el 50% del consumo eléctrico de Dinamarca.

En el campo de la energía solar fotovoltaica, en un horizonte del año 2014 se prevé el desarrollo de módulos fotovoltaicos de lámina delgada de gran superficie, y sistemas de concentración fotovoltaica que aumentan el rendimiento hasta el 25% y reducen los costes de los módulos en un 40%.

En el ámbito de la energía solar térmica, por último, en el horizonte del año 2010 se prevé el desarrollo de centrales solares termoeléctricas en configuración híbrida de carácter comercial. Se está desarrollando la planta Solar Tres, híbrida solar-gas con tecnología torre de 15 MW de potencia, y la planta PS-10 de 11 MW con tecnología torre de configuración sólo solar con almacenamiento térmico.

## **B) Almacenamiento de energía**

Una de las características de la generación con energías renovables es su disponibilidad discontinua, por lo que un sistema de almacenamiento de alta capacidad y bajo coste podría asegurar de forma competitiva el suministro de energía cuando haya baja radiación solar o viento. Este es un reto tecnológico de primera magnitud.

---

<sup>43</sup> M. Torres, EHN-INR Eólica. Gusacor Renovable. Para más información, ver Robotiker, *Vigilancia Tecnológica*, Boletín nº 68, marzo 2004 y [www.terra.org/html/s/econoticia/reportajes/renovables8.html](http://www.terra.org/html/s/econoticia/reportajes/renovables8.html).



Para ello, se está investigando en la optimización de baterías convencionales en un horizonte temporal del año 2010. El proyecto Electricity Storage and Demonstration of Renewable Energy Systems, aprobado por el VI PM de la UE, trata de estandarizar las pruebas de caracterización de las baterías plomo-ácido utilizadas en sistemas aislados de energía solar fotovoltaica para uso doméstico. También persigue construir un demostrador para desalinización por ósmosis inversa<sup>44</sup>.

Otra línea de desarrollo, de mayor riesgo tecnológico, se dirige hacia la aplicación de volantes de inercia.

### **3.8 Capacidad tecnológica de España en el campo de las energías renovables**

España cuenta con una posición tecnológica e industrial muy favorable para liderar estas tecnologías en el ámbito europeo. Hay unos recursos naturales (eólicos y radiación solar) muy importantes y un Plan Nacional de Energías Renovables que apuesta decididamente por ellas. Existe también una industria fabricante de equipos para la producción de energías renovables, una importante capacidad investigadora en los centros de investigación nacionales (CIEMAT, Plataforma Solar de Almería, CENER, Instituto Tecnológico de Canarias, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, etc.) y apoyos financieros públicos sustanciales para proyectos de investigación a través del Programa Nacional de I+D+i de la Energía y el CDTI, y financiación para la implantación de las energías renovables a través de las líneas del IDAE e ICO.

En el ámbito de la energía eólica, España es una potencia mundial en generación y producción de equipos. La empresa nacional más importante es Gamesa, que fue el cuarto mayor suministrador de aerogeneradores a escala mundial en el año 2003<sup>45</sup>. Gamesa, M. Torres, EHN y Ecotecnia han sido, entre otras, las empresas más activas en proyectos de I+D de energía eólica, financiados por el Plan Nacional de I+D+i y el CDTI<sup>46</sup>.

Atendiendo a la propiedad de los parques eólicos, tres de las cinco empresas con mayor potencia instalada en el mundo son españolas: Iberdrola, líder mundial, Acciona (EHN) en tercer lugar y Endesa en cuarto puesto. Los 20 mayores propietarios mundiales explotan la tercera parte de la potencia eólica instalada. Según la Plataforma Eólica Empresarial, el sector eólico contaba a finales de 2003 con 300 empresas. De ellas, la mitad son fabricantes de

---

<sup>44</sup> CORDIS FP6: Find a Project. <http://dbs.cordis.lu/>.

<sup>45</sup> Para más información véase [http://www.emerging-energy.com/pr\\_globalwind.html](http://www.emerging-energy.com/pr_globalwind.html); [http://www.emerging-energy.com/pr\\_may\\_2005.html](http://www.emerging-energy.com/pr_may_2005.html) y [http://www.emerging-energy.com/pr\\_april\\_2005.html](http://www.emerging-energy.com/pr_april_2005.html).

<sup>46</sup> Fuente: CDTI, *Perspectiva CDTI*, número 23, diciembre 2004.

componentes y el resto son promotores y explotadores de parques eólicos; dan empleo a 5.000 personas de forma directa y a 12.000 de forma indirecta, con unas previsiones de crecimiento del 11% anual, lo que daría lugar a la creación de 34.000 puestos de trabajo desde el 2004 hasta el 2011 (Villanueva e Hidalgo, 2003).

En el área de la energía fotovoltaica, según Photon Internacional, la empresa nacional más destacada, Isofoton, ocupa en Europa el primer lugar como productor y el octavo en el mundo. Es una empresa muy innovadora, habiendo desarrollado desde diciembre de 2004 cuatro proyectos de I+D, que han contado con el apoyo del Plan Nacional de I+D+i y de CDTI<sup>47</sup>. También hay otras empresas multinacionales con plantas de desarrollo y producción en España, como BP Solar o Atersa. En energía solar termoeléctrica hay que mencionar al grupo Abengoa.

España cuenta con más de 300 empresas dedicadas a la instalación, mantenimiento y desarrollo de proyectos, tanto en energía solar fotovoltaica como térmica (se suelen ofertar ambos tipos de instalaciones). Se estima que dan empleo directo a 2.400 trabajadores e indirecto a otros 1.200 (García Brea, 2004).

---

<sup>47</sup> *Perspectiva CDTI*, número 24, abril 2005. <http://www.cdti.es/webCDTI/esp/docs/fgenerales/Revista%2024.pdf>.

## 4. La desalación de agua de mar mediante el empleo de energías renovables

### 4.1 Situación actual de la aplicación de las energías renovables a desalinización

Existen diversos factores que hacen de la desalación de agua de mar una aplicación atractiva para las energías renovables. Por una parte, muchas zonas con escasez de agua dulce tienen recursos de energía primaria de tipo renovable, generalmente energía eólica o solar. Además, se suele producir la simultaneidad estacional en la demanda de agua potable y la disponibilidad de los recursos energéticos renovables (Zarza, 1998). Éste es el caso de la costa mediterránea y de las islas Canarias, en las que la disponibilidad de energía eólica y solar es mayor en el verano, coincidiendo con una mayor demanda de agua potable por el incremento de la población turística.

Hay que distinguir dos situaciones a la hora de enfocar este tema. La primera la constituyen las zonas aisladas o remotas, en las cuales la necesidad de agua dulce, unida a la inexistencia de una red de energía eléctrica, justifica la construcción de un sistema autónomo de generación de energía, en el que el coste del kilovatio hora obtenido pasa a ser un factor secundario frente a la necesidad perentoria del agua. Otro caso muy distinto son las zonas conectadas a la red eléctrica, en las que los costes se convierten en un factor primordial para la toma de decisiones sobre la inversión.

Como se ha señalado, el coste del agua desalada tiene dos componentes muy importantes, que son los derivados del capital o inversión (amortización, coste de oportunidad y coste de financiación) y el coste energético. El empleo de energía renovable como fuente de energía en zonas no aisladas sólo tendría interés si se lograra un coste energético menor que el precio actual de adquisición en el mercado. Asimismo, no todas las fuentes de energía primaria renovable son igualmente adecuadas para los procesos de desalación. Algunos procesos utilizan energía térmica o vapor (MSF, MED, CV), mientras que otros usan electricidad (OI, CV, MSF y MED) y algunos pueden emplear energía mecánica (OI, CV). Por lo tanto, hay que seleccionar la fuente energética en función del proceso de desalación. La energía eólica puede generar energía mecánica o electricidad, mientras que la solar fotovoltaica y termoeléctrica generan electricidad, y la solar térmica, calor.

Para la desalación de agua de mar por ósmosis inversa con energía eléctrica de origen renovable se han realizado proyectos que utilizan energía fotovoltaica para capacidades de hasta 50 m<sup>3</sup>/día y energía eólica para capacidades de desalación de hasta 250 m<sup>3</sup>/día. En el caso de desalación de agua de mar con un proceso de evaporación MED se ha utilizado energía solar térmica de baja temperatura. Otra integración de proceso ha sido energía eólica con compresión de vapor<sup>48</sup>.

El suministro de energía renovable a instalaciones de gran capacidad es un caso diferente, del que no hay experiencia. El tamaño de la planta de desalación condiciona el tamaño de la planta de generación energética que necesita y el tipo de energía más viable. Una planta de ósmosis inversa para desalación de agua de mar (que es la tecnología de menor consumo energético) con capacidad para 30.000 m<sup>3</sup>/día de agua dulce requiere una potencia de 5 MW para funcionar a plena carga. Esta potencia se puede conseguir con cinco aerogeneradores eólicos de 1 MW o con 90.000 m<sup>2</sup> de paneles solares fotovoltaicos<sup>49</sup>. Estos datos descartan, a día de hoy, la energía fotovoltaica para suministro de energía con potencias medias, además de por su coste más elevado, dejando a la energía eólica como la alternativa tecnológica más viable. Por otra parte, conviene destacar el hecho del funcionamiento aislado de la planta (2.000 horas efectivas de funcionamiento al año para un aerogenerador y 1.500 horas efectivas para un parque fotovoltaico), que sólo permitiría aprovechar el 25% de su capacidad productiva si utiliza energía eólica, o el 15% si emplea energía solar fotovoltaica.

Esta opción de funcionamiento aislado no está exenta de incertidumbres tecnológicas, pues la alimentación de energía a una planta de desalación a través de fuentes no estables puede causar problemas de operación. El proyecto REDDES, financiado por el programa de investigación ALTENER de la UE, para la desalación de agua de mar en zonas aisladas y remotas empleando energías renovables, marca tres estrategias para conseguir una potencia constante:

- Combinar fuentes energéticas de distinta naturaleza, renovables o no, reduciendo la probabilidad de fallo de suministro de cada una por separado.
- Ajustar la cantidad de agua desalada a la potencia generada en cada momento, realizando instalaciones modulares que se puedan desconectar fácilmente, y con diseños robustos para funcionar fuera del punto de consigna.
- Sobredimensionar el generador, ajustando la potencia a un valor constante inferior, que será el de la planta de desalación.

---

<sup>48</sup> Para más información, véase Loupasis (2002), Cruz (2004), Koroneos y Wangnik (2004).

<sup>49</sup> Este cálculo se ha realizado con módulos de una potencia de 55 Wp/m<sup>2</sup> a semejanza de la planta Sevilla PV, que con una potencia de 700 kWp necesita 126 heliostatos de 100 m<sup>2</sup>. En la planta alemana Baviera Solarpark se ha instalado una potencia de 10 MW, ocupando 250.000 m<sup>2</sup>, lo que daría una potencia de 40 W/m<sup>2</sup>.

Por otra parte, la interconexión de grandes cargas a la red, que demanden energía con un comportamiento variable o fluctuante, puede ocasionar problemas en redes eléctricas débiles.

Hay que señalar la existencia de diversas iniciativas de carácter internacional, dirigidas a la implementación de políticas y desalación de pequeña capacidad, con energías renovables para zonas remotas en los países mediterráneos, como el proyecto ADU-RES y el proyecto ADIRA<sup>50</sup>.

## 4.2 Proyectos relevantes de demostración

España cuenta con una amplia experiencia en proyectos demostradores de desalación que utilizan como suministro energía renovable. El informe de desalación del año 2004 de IDA incluye un inventario de plantas desaladoras de más de 100 m<sup>3</sup>/día de capacidad, y dedica un apartado especial a las plantas de demostración de desalinización con energías renovables (Wangnick, 2004:11-1). Los datos muestran que los mayores esfuerzos se han realizado en la integración de energía solar con ósmosis inversa y con procesos de destilación, si bien los proyectos de mayor capacidad (300 m<sup>3</sup>/día), que precisamente se han realizado en los últimos años, corresponden a la integración de la energía eólica con ósmosis inversa. Una excepción destacable es el caso de Milos (Grecia), que integra energía geotérmica y MED.

A continuación se describen los proyectos más relevantes realizados en España, que está al primer nivel tecnológico mundial en este campo. Como se podrá comprobar, son proyectos de investigación en los que la capacidad de desalación es pequeña. En el caso de la energía solar, como ya se ha comentado, estas experiencias no son extrapolables para plantas de mediana capacidad, debido a su elevado coste y a la necesidad de una gran superficie de terreno para ubicar el parque de colectores o captadores solares.

### A) Energía eólica y ósmosis inversa

Las islas Canarias se han convertido en un laboratorio en tecnologías de desalación mediante energías renovables. Los proyectos que se comentan a continuación son de demostración, y no se benefician de las reducciones de costes que se pueden obtener aplicando economías de escala<sup>51</sup>.

El proyecto AERODESA I contempló un aerogenerador de 15 kW con acoplamiento mecánico a una planta de ósmosis inversa de 10 m<sup>3</sup>/día, con funcionamiento en régimen

---

<sup>50</sup> Para más información, véase Epp y Papapetrou (2004) y Seibert *et al.* (2004).

<sup>51</sup> Para más información, véase Schallenberg, ITC (2004), Cruz (2004) y Subiela *et al.* (2004).

variable. Una variante, AERODESA II, integró dos módulos de ósmosis inversa de 20 m<sup>3</sup>/día con sistema de acoplamiento hidráulico, que permitía una elevada automatización de la planta. En el proyecto AEROGEDESA, una planta de OI de 17 m<sup>3</sup>/día está conectada eléctricamente a un aerogenerador, conectado a un banco de baterías para almacenamiento de energía.

Por otra parte, en el proyecto PRODESAL, también desarrollado en las islas Canarias, se introduce el estudio del comportamiento discontinuo de una planta de ósmosis inversa alimentada con energía renovable. Un aerogenerador de 200 kW (600 MWh/año) suministra energía a una planta de ósmosis inversa de 200 m<sup>3</sup>/día. En este proyecto se han desarrollado membranas para funcionamiento discontinuo, bastidores, y se aplicó una bomba de émbolo y turbina de recuperación Pelton.

SDAWES (*Seawater Desalination with an Autonomus Wind System*) es otro proyecto realizado por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, que compara diversas tecnologías de desalación con generación eólica. Como sistema de generación integró dos aerogeneradores de 230 kW, un volante de inercia de 100 KVA que filtra las fluctuaciones de potencia y una UPS de 7,5 kW. Como sistemas de desalación empleó una planta de ósmosis inversa de 25 m<sup>3</sup>/día y consumo 7,2 kWh/m<sup>3</sup>, una planta de compresión de vapor al vacío de 50 m<sup>3</sup>/día y consumo 16 kWh/m<sup>3</sup> y un sistema de electrodiálisis reversible de capacidad 190 m<sup>3</sup>/día y consumo 3,3 kWh/m<sup>3</sup>. Se concluyó que la ósmosis inversa era la mejor tecnología de desalación utilizando energía eólica, especialmente si funciona con bombas a caudal variable, pese a la reducción de vida de las membranas.

Un proyecto emblemático fue el realizado en Punta Jandía (Fuerteventura). Se trataba de un sistema eólico diésel para electrificación y desalación. La planta suministraba energía, agua, frío y hielo a un poblado de pescadores, con una población de entre 61 personas en invierno y 450 en verano. La planta desalinizadora de ósmosis inversa tenía una capacidad de 56 m<sup>3</sup>/día y consumo 16,5 kW, y sólo desalaba cuando se generaba energía eólica, durante 1.500 horas/año. Tenía un depósito con autonomía para 4 meses.

## **B) Energía solar térmica y destilación**

El proceso de evaporación MED, a diferencia del proceso MSF, sólo necesita calentar el agua a 70 °C, lo que reduce considerablemente los costes de inversión de los captadores solares para conseguir la energía que necesita la planta. Un sistema de almacenamiento del fluido asegura el funcionamiento en régimen permanente cuando no haya radiación solar o haya fluctuaciones de radiación. Este sistema de almacenamiento puede ser un depósito aislado que almacena el fluido u otro material que conserve el calor (placas de hierro, cerámica, etc.)<sup>52</sup>.

---

<sup>52</sup> Para mayor información, véase Loupasis (2002), Zarza (1998), Zarza y Blanco (1996), Blanco y Alarcón (2002 y 2004) y Schallenberg.

La Plataforma Solar de Almería es una referencia en el mundo en tecnologías de desalación con energía solar. Uno de los proyectos realizados integró la desalación con tecnología MED, un campo de colectores solares térmicos de tipo cilindro parabólico y un tanque de almacenamiento de aceite térmico, que actúa como medio calorportador y medio de almacenamiento de la energía térmica. Una evolución de este proyecto ha sido AQUASOL (*Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technologies*), en el que la energía es aportada por un campo de 500 m<sup>2</sup> de colectores solares parabólicos sin sistema de seguimiento (menor coste) y el almacenamiento térmico es por agua (más económico que el aceite térmico); además, emplea una bomba de calor en lugar de un turbocompresor. En este proyecto también se estudia el funcionamiento discontinuo y se introduce un secador solar avanzado para la valorización de la salmuera en una salina.

El proyecto SODESA en las islas Canarias, aprobado por el Programa Joule, utilizaba energía térmica a baja temperatura, proporcionada por 50 m<sup>2</sup> de colectores solares, con un sistema de acumulación de agua de mar caliente y destilación MED con capacidad de 0,7 m<sup>3</sup>/día. El sistema de acumulación de agua de mar caliente reducía las pérdidas y permitía el funcionamiento continuo de la planta 24 horas al día.

### C) Energía solar fotovoltaica y procesos de ósmosis inversa

Un sistema de captación fotovoltaica genera una corriente continua, la cual se puede aplicar directamente a los electrodos de una cuba de electrodiálisis para desalar agua salobre, o convertirla a corriente alterna y alimentar a una bomba de alta presión para los procesos de ósmosis inversa<sup>53</sup>.

En España existe la experiencia del proyecto DESSOL en Canarias, en el que una planta fotovoltaica de 4,8 kWp y un sistema de baterías alimentaban una planta de ósmosis inversa de 3 m<sup>3</sup>/día.

## 4.3 El coste del agua desalada con energías renovables

Este artículo parte de la premisa de que los costes de desalación se recuperen en el mercado del agua exclusivamente. Algunas iniciativas proponen la implantación de sistemas de desalación con energías renovables, que vendan energía al sistema eléctrico y, cuando el precio sea bajo, se destine la energía a la desalación, funcionando la planta de modo discontinuo con los problemas señalados con anterioridad. Este trabajo no adopta ese

---

<sup>53</sup> Para más información, véase Loupasis (2002) y Schallenberg. La electrodiálisis se aplica a desalación de aguas salobres pero no de agua marina, debido a su elevado consumo energético.

planteamiento porque no se asegura una producción de agua, e incluso en el caso de que la planta estuviera conectada a la red, el porcentaje de tiempo de desalación con energía renovable sería tan marginal que difícilmente podría calificarse al sistema como tal. Es más, se podría considerar que la tarifa o prima pagada por el mercado eléctrico por la adquisición de energía renovable estaría subvencionando el coste del agua.

La propuesta de este artículo es que la energía renovable se emplee en la planta directamente y no se venda a la red, salvo que haya un excedente si se sobredimensionara el parque eólico para asegurar un mayor número de horas de funcionamiento de la planta a su capacidad máxima. No será éste el caso que se exponga en el estudio, ya que se dimensionará de acuerdo a la potencia nominal de la planta de desalación.

Tampoco se considera que el proyecto perciba ninguna ayuda financiera (subvenciones o créditos blandos) que reduzca los costes del capital, como es habitual que ocurra en la implantación de energías renovables. Si se tuvieran en cuenta estos efectos, se reducirían significativamente los costes del agua desalada.

Con el estado actual del arte, los procesos por ósmosis inversa son los de menor necesidad de inversión y consumo energético. En cuanto a energías renovables, la más viable, desde el punto de vista comercial, es la energía eólica, tanto por coste como por la potencia que puede aportar. Se compararán los costes de autoproducción de energía eléctrica con el precio de adquisición de la energía a la red y la viabilidad económica del funcionamiento aislado de la red de modo discontinuo (dependiente de la disponibilidad de energía eólica), frente al funcionamiento continuo conectada la planta a la red eléctrica, que suministraría energía en caso de que fluctúe la generación eólica.

Aunque el coste del combustible para la generación eléctrica con energías renovables es cero, no lo es la inversión, que tiene un coste de amortización de capital, un coste de oportunidad y un coste financiero. Para reducir el coste del kWh generado hay dos vías principales. La primera es la reducción de los costes de inversión con economías de escala, el empleo de componentes estándar, el desarrollo tecnológico para integrar subsistemas comunes a los procesos de desalación y generación eléctrica y la eliminación de los procesos de conversión energética que impliquen pérdidas de rendimiento.

La segunda vía de reducción de costes es aumentar el número de horas efectivas de generación con energía renovable, aumentando la eficiencia de los equipos, buscando una localización adecuada donde haya una mayor disponibilidad de energía primaria y utilizando sistemas de almacenamiento de energía de bajo coste.

La Tabla 7 muestra los requisitos de inversión en €/kW y horas mínimas de funcionamiento que se le deberían requerir a un sistema de generación con energía primaria renovable para que sea competitivo con el coste de la energía eléctrica adquirida a la red,



**Tabla 7. Coste de la energía eléctrica de origen renovable en función de la inversión unitaria, la disponibilidad anual de la planta y el coste de oportunidad de la inversión**

Coste oportunidad inversión		5%			10%		
		0,048	0,060	0,072	0,048	0,060	0,072
Coste energía (€/kWh)		0,048	0,060	0,072	0,048	0,060	0,072
<b>Número de horas efectivas de funcionamiento</b>							
Inversión (€/kW)	Menos de 600	1.300	–	–	1.960	–	–
	De 600 a 800	1.800	1.340	–	2.620	1.470	–
	<b>De 800 a 1.000</b>	<b>2.200</b>	<b>1.675</b>	<b>1.340</b>	–	<b>1.960</b>	<b>1.560</b>
	De 1.000 a 1.200	2.600	2.010	1.605	–	2.450	1.950
	De 1.200 a 1.400	–	2.345	1.875	–	–	2.340
	De 1.400 a 1.600	–	–	2.140	–	–	–
	De 1.600 a 1.800	–	–	2.410	–	–	–

Fuente: Elaboración propia

independientemente de la tecnología seleccionada (eólica o solar). Se muestran tres escenarios de costes energéticos: 0,048 €/kWh, 0,060 €/kWh y 0,072 €/kWh<sup>54</sup>.

Un sistema de generación que necesite una inversión de 800 a 1.000 €/kW funcionando 2.200 horas produciría energía a un coste de 0,048 €/kW (con un coste de oportunidad del 5%), mientras que si funcionara 1.675 horas produciría energía a un coste de 0,06 €/kW. Actualmente, la energía eólica requiere una inversión de 900 €/kW y un número de horas efectivas de generación de 1.890 (según datos de generación eléctrica de 2004), que está muy próxima a ser competitiva con el precio de adquisición de la energía a la red eléctrica (0,0485 €/kWh).

Las energías solar termoeléctrica y fotovoltaica requieren unas inversiones muy superiores (2.700 €/kW la termoeléctrica y 6.000 €/kW la fotovoltaica), por lo que todavía están en una fase muy lejana de ser competitivas con las fuentes de energía convencionales.

Por otra parte, hay que analizar la mejor estrategia de operación de una planta de desalación, eligiendo si únicamente funciona con recursos renovables de forma discontinua, o es más beneficioso conectarla a la red eléctrica cuando no haya suficiente generación

<sup>54</sup> Se ha supuesto un coste de operación y mantenimiento similar con todas la fuentes energéticas, para simplificar los cálculos, de 0,012 €/kWh, sin tener en cuenta el factor de escala ni el tipo de sistema de generación. Se han utilizado otras dos hipótesis del coste de oportunidad para el inversor, del 5% y del 10%, que se ha imputado al coste del kWh generado.

**Tabla 8. Costes de producción de agua de mar desalada utilizando energía eléctrica eólica. Variación de los costes, según la disponibilidad anual de la planta eólica**

Horas ER / Horas red	Aislado de la red funcionamiento discontinuo				Conectado a red funcionamiento continuo			
	1800/0	2000/0	2200/0	2400/0	1800/6484	2000/5884	2200/5684	2400/5484
Coste energía eólica €/kWh	0,052	0,048	0,045	0,042	0,052	0,048	0,045	0,042
Amortización planta desalación OI (€/m <sup>3</sup> )	0,500	0,450	0,409	0,375	0,114	0,114	0,114	0,114
Coste energía y operación (€/m <sup>3</sup> )	0,319	0,303	0,291	0,279	0,307	0,303	0,300	0,296
Coste oportunidad (€/m <sup>3</sup> )	1,472	1,242	1,068	0,925	0,089	0,089	0,089	0,089
<b>Coste total agua (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2,291</b>	<b>1,995</b>	<b>1,768</b>	<b>1,579</b>	<b>0,510</b>	<b>0,506</b>	<b>0,503</b>	<b>0,498</b>

Fuente: Elaboración propia

de energía renovable. El funcionamiento no continuo de la planta implica que la inversión se ha de amortizar con una producción menor de agua y, por lo tanto, suben los costes de amortización por metro cúbico producido. Por otra parte, la interconexión a la red puede requerir mayores inversiones en los equipos y un precio superior del kWh adquirido a la red, si se aplicara una tarifa eléctrica más alta por un menor consumo.

Dado que la utilización de energía eólica es la fuente renovable con más expectativas en el campo de la desalación de agua de mar con ósmosis inversa, en la Tabla 8 se realiza una simulación que contempla la integración de ambas tecnologías<sup>55</sup>, mostrando cómo evolucionan los costes del agua desalada si el sistema eólico está aislado de la red con diferentes horas equivalentes de funcionamiento al año, o conectado a la red cuando no hay energía eólica suficiente.

Como puede observarse, si la planta funciona de forma aislada, el coste del agua está en torno a 2 €/m<sup>3</sup>, mientras que si funciona conectada a la red cuando no hay energía eólica, el coste se reduce a 0,5 €/m<sup>3</sup>, debido a menor imputación de los costes de amortización por m<sup>3</sup> de agua producido, que es una cifra que está en orden con los costes actuales del

<sup>55</sup> Se ha considerado una inversión del aerogenerador de 900 €/kW, un coste de operación de 0,012 €/kW y un coste de oportunidad de la inversión del 5%. El sistema de desalación por ósmosis inversa se ha supuesto que requiere una inversión de 750 €/m<sup>3</sup>/día, una disponibilidad del 90%, un consumo energético de 4 kWh/m<sup>3</sup>, unos costes de mano de obra y consumibles de 0,11 €/m<sup>3</sup>; también se ha supuesto un coste de oportunidad de la inversión del 5%. El coste de energía adquirida a la red se ha supuesto de 0,048 €/kWh.

agua desalada comprando energía a la red, pero con las ventajas de que los costes de la energía eólica se mantendrán constantes en el futuro y no dependerán del precio de las materias primas energéticas, cuya tendencia irá previsiblemente al alza.

Por otra parte, los estudios de sensibilidad de costes ante los diferentes componentes de una planta de desalación por ósmosis inversa alimentada con energía eólica muestran una gran dependencia de la capacidad de la planta, del consumo de energía, de los gastos de operación y mantenimiento, de la velocidad del viento y de los costes de oportunidad. Y, sin embargo, una baja dependencia del tipo de aerogenerador que se utilice y del coste de las membranas (García Rodríguez *et al.*, 2001)<sup>56</sup>.

Aplicando la misma simulación a un sistema que funcionara en modo aislado, quedaría justificada la implantación de un sistema de almacenamiento de energía que proporcione un funcionamiento continuo de la planta, si el coste total (generación y almacenamiento) no superara los 3.500 €/kW de potencia instalada.

Como se ha comentado al comienzo de este apartado, con el objetivo de reducir los costes del agua desalada algunos autores han propuesto sobredimensionar el sistema de generación eléctrica y vender energía eólica a la red, pudiendo llegar a una reducción del coste del agua desalada del 30%, en el caso de que la producción máxima del parque eólico al año sea el doble de la potencia de la planta de desalación<sup>57</sup>.

A continuación se muestran los costes de los proyectos de investigación y demostración comentados en el apartado anterior, que son muy superiores a los calculados en las simulaciones de este estudio, debido a dos razones: la primera es que se trata de prototipos y no de sistemas industrializados, son proyectos singulares que no han sido replicados optimizando costes; la segunda es que su capacidad de desalación es muy pequeña y no se pueden aprovechar de las economías de escala de las grandes plantas.

Las experiencias de los proyectos demostradores de desalación por ósmosis inversa a partir de energía eólica (AERODESA I y II, y AEROGEDESA) exhiben unos costes de desalación de entre 3,1 y 4,2 €/m<sup>3</sup>. Se supone que, para sistemas industrializados con recuperación de energía, el coste se podría reducir en torno al 50%. En el proyecto SWADES el coste del agua está en torno a 0,82 €/m<sup>3</sup>.

---

<sup>56</sup> Este estudio se realiza con tres aerogeneradores: uno de 600 kW, otro de 600 kW especial para velocidades de viento bajas y un tercero de 750 kW, cuya inversión varía entre 900 y 1.200 \$/kW; con una velocidad de viento media de 7 m/s y la distribución probabilística del viento (distribución de Weibull) tienen un parámetro de forma de 2. La planta de desalación de ósmosis inversa puede funcionar en un rango de 200 a 3.000 m<sup>3</sup>/día, con un consumo específico de 5 kWh/m<sup>3</sup>, una inversión de 1.400 \$/día, y disponibilidad de la planta del 90%. Se considera una vida útil de 20 años.

<sup>57</sup> Para más información, véase Schallenberg y Hensel y Uhl (2004).

El proyecto de desalación de agua con tecnología MED y energía solar térmica realizado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), con captación de energía por colectores cilindro parabólicos y sistema de almacenamiento de aceite térmico da un coste de 2 €/m<sup>3</sup> para una capacidad de desalación de 5.000 m<sup>3</sup>/día. El proyecto AQUASOL reduciría los costes anteriores abaratando el coste de los colectores empleados, al sustituir el aceite térmico por agua y el turbocompresor por una bomba de calor<sup>58</sup>.

La potencia que se genera con un sistema fotovoltaico es pequeña. Los costes del agua desalada utilizando esta fuente de energía renovable son de 5,5 a 20 €/m<sup>3</sup> para desalación de agua de mar (de 12 a 120 m<sup>3</sup>/día) por ósmosis inversa (Loupassis, 2002). El proyecto DESSOL de las islas Canarias muestra un coste de desalación de agua de mar con ósmosis inversa de 7,9 €/m<sup>3</sup>; si se industrializara el sistema, se podría llegar a 3,5 €/m<sup>3</sup> (Schallenberg).

#### 4.4 Tendencias tecnológicas

Las tecnologías de desalación y de generación de energías renovables están todavía en fase de desarrollo y progresivamente van reduciendo sus costes. La energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica está próxima a ser competitiva, con respecto a otras fuentes de energía convencionales. Uno de los problemas a solventar es que las energías renovables no son las más adecuadas para atender de forma autónoma grandes demandas de energía, mientras que las plantas de desalación se benefician en gran medida de las economías de escala. Es por ello por lo que hay que identificar el nicho de mercado por tamaño de planta donde su integración sea más competitiva.

Las tendencias comentadas para desalación de agua de mar por ósmosis inversa en el capítulo “La desalinización de agua de mar” y para la energía eólica, en tierra o en la costa, en el capítulo “Las energías renovables”, serían válidas para su integración. Estas tecnologías son comerciales, aunque no existen antecedentes para plantas de tamaño medio, por lo que se presentan algunos retos:

- La reducción de la inversión de los equipos eólicos en un 30%, bien por el desarrollo de grandes máquinas multimegavatio (economías de escala) o por reducción de costes de producción.
- La reducción de la inversión de las plantas de ósmosis inversa.
- La reducción de su consumo energético, mejorando los sistemas de recuperación energética.

---

<sup>58</sup> Para más información, véase Blanco (2004), Loupassis (2002), Zarza (1998) y Zarza y Blanco (1996).

- El funcionamiento de la planta con fuentes discontinuas de aprovisionamiento.
- El comportamiento de redes eléctricas débiles ante grandes cargas variables.

A continuación se expondrán dos líneas actuales de investigación: la desalación (*off-shore*) por ósmosis inversa utilizando energía eólica y las últimas iniciativas de aplicación de la energía solar a la desalación de pequeñas capacidades de agua en zonas aisladas de la red.

### **A) Plataformas marinas de energía eólica y desalación por ósmosis inversa**

El viento en el mar, lejos de la costa, es superior y más regular que en tierra, presentando las palas una fatiga menor y, por lo tanto, una vida mayor<sup>59</sup>. Por otra parte, el impacto visual a 10-20 km de distancia de la costa es nulo. El litoral español, sin embargo, presenta características distintas a otras regiones con tradición en tecnología *off-shore*, como Dinamarca, debido a que la profundidad de nuestros fondos marinos, superior a 20 metros, no los hace adecuados para la cimentación de los aerogeneradores. Las alternativas tecnológicas son recurrir a plataformas flotantes<sup>60</sup> o mejorar los sistemas de cimentación de bajo coste para aguas profundas.

Por otra parte, se ha de estudiar la reducción de los costes de desalación mediante aspectos que reduzcan las necesidades energéticas de las plantas: mejoras en el acoplamiento de los módulos de ósmosis inversa a las turbinas eólicas, el estudio de nuevos sistemas de acoplamiento mecánico en lugar de eléctrico, la recuperación de energía y el desarrollo de tecnología de membranas (García Rodríguez *et al.*, 2001).

La empresa nacional M. Torres ha presentado recientemente (*Ambienta*, abril 2005) una propuesta para el desarrollo de una plataforma marina biflotador de forma circular, que se orienta en dirección al viento<sup>61</sup>. La plataforma tiene un aerogenerador en el centro, con torre de perfil aerodinámico y un sistema de membranas de ósmosis inversa. El agua desalada se lleva por una conducción a tierra (no existiendo problemas, en caso de rotura, sobre las comunidades bentónicas), mientras que la salmuera se vierte en las inmediaciones de la plataforma, que puede estar ubicada en aguas profundas, lejos de comunidades bentónicas y con elevado hidrodinamismo marino. La plataforma cuenta también con una turbina para recuperación de energía eléctrica, pudiendo evacuarse los excedentes a través de un cable submarino o aprovechándolos en la propia plataforma flotante<sup>62</sup>.

---

<sup>59</sup> Para más información, véase <http://www.windpower.org>.

<sup>60</sup> Para más información, véase Cruz (2004).

<sup>61</sup> El agua y la energía como motor de desarrollo sostenible. Planta desaladora de agua por ósmosis inversa sobre plataforma flotante con energía eólica como fuerza motriz, *Ambienta*, abril 2005.

<sup>62</sup> La empresa cuenta con tres solicitudes de patente de invención relativas al aerogenerador sobre lecho acuático, un sistema de transformación de energía eólica en energía hidráulica y un sistema de filtrado de agua marina para desaladoras. Fuente OEPM. Documentos P2004023338, P200402824 y P200501110.

Las ventajas de este sistema se basan en la utilización de una sola etapa de bombeo, que ahorra inversión y consumo en la reducción de los costes de inversión de la plataforma propuesta sobre los sistemas actuales de pilotaje de aerogeneradores marinos y en una menor necesidad de tratamientos previos a las membranas.

El CDTI ha aprobado en el año 2005 la financiación a esta empresa de dos proyectos de I+D para el desarrollo de los prototipos del sistema de desalación y de la plataforma marina<sup>63</sup>.

Como se ha comentado con anterioridad, para reducir los costes de agua desalada debería tener un funcionamiento continuo que aminore la imputación de los costes de amortización por m<sup>3</sup> de agua, y para ello debería conectarse a la red eléctrica cuando la energía eólica no sea suficiente para mantener la máxima capacidad de la planta.

### **B) Aplicación de la energía solar a la desalación**

Aunque ya se ha comentado algún proyecto de demostración en el campo de la energía solar fotovoltaica, se sigue investigando para reducir los costes energéticos mejorando el rendimiento de los sistemas de captación solar y el almacenamiento de energía.

El CDTI aprobó en el año 2004 a la empresa ISOFOTON el proyecto Desalinización mediante ósmosis inversa alimentada con energía solar fotovoltaica, en colaboración con el ITC. También ha aprobado un proyecto NEOTEC (Nuevas empresas de base tecnológica) a la compañía canaria Dobon's Technology, SL (Dobontech) para el desarrollo de un seguidor solar TETRA-TRACK fotovoltaico, con el objetivo de integrarlo en desalación.

## **4.5 Capacidad tecnológica de España en la desalinización de agua de mar con energías renovables**

En el campo de la investigación básica España cuenta con dos centros de referencia: CIEMAT-PSA, en energía solar y destilación multiefecto MED, y el Instituto Tecnológico de Canarias, en energía eólica y ósmosis inversa. No se han realizado en España ni en el mundo proyectos de demostración de plantas de gran capacidad que desalen con energía renovable.

Existen importantes empresas españolas fabricantes de equipos de generación de energía eólica y fotovoltaica, que tienen presencia internacional y que están investigando la aplicación de la generación renovable para la desalación de agua.

---

<sup>63</sup> Fuente CDTI.

En el campo de la ingeniería, en España hay una capacidad muy alta en el desarrollo y gestión de proyectos multidisciplinarios de gran envergadura. Grandes empresas constructoras y eléctricas están tomando posiciones en los mercados de desalación por ósmosis inversa y de energía eólica de modo independiente, si bien podría haber en un futuro una oferta conjunta y diferencial respecto a la existente para determinado tamaño de plantas, que integre las tecnologías de desalación por ósmosis inversa con energía eólica, si hubiera una demanda por parte de la Administración.

En general, se puede afirmar que se trata de tecnologías que siguen evolucionando hacia una reducción de costes y en las que España parte de una posición que podría llegar a ser de liderazgo mundial, en el sentido de que tiene investigación básica (ingeniería y construcción), aunque no tenemos una posición favorable en componentes para desalación (membranas).

El mercado potencial para estas tecnologías es muy importante y las empresas nacionales tienen capacidad de presentarse a concursos internacionales, como ha quedado demostrado en el último año, con una elevada solvencia técnica, industrial y financiera.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La costa mediterránea y las islas Canarias tienen un importante déficit de agua dulce y un gran potencial de recursos aprovechables en energías renovables. El aprovechamiento de estas energías para alimentar una planta de desalación de agua de mar se ha planteado a nivel de investigación para instalaciones de pequeña capacidad en zonas remotas o aisladas, donde el coste es un factor secundario frente a la necesidad perentoria de agua. Estos proyectos han integrado tres tipos de tecnologías: ósmosis inversa con generación eléctrica de origen fotovoltaico, ósmosis inversa con generación eléctrica o mecánica de origen eólico y destilación con generación de vapor en captadores solares. Los prototipos realizados presentan unos costes elevados, debidos, en parte, a que no se han beneficiado de las economías de escala de las grandes plantas comerciales conectadas a la red. Hay que señalar que la integración de estas tecnologías en zonas conectadas a la red eléctrica no ha suscitado interés.

Cuando se trata de plantas de mediana capacidad, las tecnologías de desalación de agua de mar con energías renovables que presentan una mayor viabilidad técnico comercial son la desalación por ósmosis inversa y la generación de energía eléctrica de origen eólico (en tierra o en mar)<sup>64</sup> que, funcionando en modo no aislado de la red eléctrica, podrían llegar a conseguir un coste del agua desalada de 0,5 €/m<sup>3</sup>, similar a los costes con los que operan las plantas actuales, pero con las importantes ventajas de ocasionar un menor impacto ambiental por una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y de asegurar el coste energético futuro, ya que es independiente de la evolución del precio de los combustibles fósiles con los que se genera la energía eléctrica. Sin embargo, no existe ninguna implantación en la actualidad que permita descartar potenciales problemas tecnológicos derivados de la escalabilidad de la planta, principalmente los achacables al funcionamiento fluctuante del sistema de generación eólico y la demanda variable de energía de la planta a la red eléctrica, sobre todo si se trata de una red débil.

El estudio de costes realizado para esta propuesta eólica-ósmosis inversa no ha considerado los ingresos que pudieran existir por la venta de energía eléctrica a la red, ni ningún

---

<sup>64</sup> Una planta de ósmosis inversa necesita una inversión entre 600 y 1.085 €/m<sup>3</sup>/día de agua producida, mientras que un parque eólico requiere una inversión media de 900 €/kW. El consumo energético para desalar agua es 4 kWh/m<sup>3</sup> con una tendencia a 3 kWh/m<sup>3</sup>. La energía eólica puede permitir 2.000 horas efectivas de funcionamiento autónomo. Si la planta funciona de forma aislada, el coste del agua desalada es 2 €/m<sup>3</sup>, mientras que si funciona conectada a la red eléctrica cuando hay baja generación eólica, el coste del agua se reduce a 0,5 €/m<sup>3</sup>.



tipo de ayuda financiera a la inversión (subvenciones o créditos), como ocurre con la implantación de las energías renovables. En el caso de contar con ellos, los costes del agua desalada se reducirían significativamente.

Las tendencias tecnológicas se dirigen hacia una reducción de los costes de inversión en ósmosis inversa y eólica y hacia un menor consumo energético con sistemas más eficientes de recuperación de energía, aunque también hay otras iniciativas interesantes en el ámbito de plantas marinas (*off-shore*).

España tiene empresas muy importantes en los ámbitos de la desalación por ósmosis inversa y de las energías renovables, que no están integradas, con una alta capacidad tecnológica, industrial y financiera. También tenemos cualificados centros de investigación con reconocimiento internacional. La implantación y el desarrollo de estas tecnologías son una oportunidad y un reto para España y su tejido industrial, y una puesta en marcha decidida necesita de una serie de medidas:

- Coordinación de la Administración central y de las autonómicas con competencias en el ámbito del agua, medio ambiente y energía, para potenciar la implantación de este tipo de plantas si se considera de interés, realizando previamente uno o varios proyectos de demostración para capacidades de 2.500 y 10.000 m<sup>3</sup>/día. El liderazgo debería correr a cargo del Ministerio de Medio Ambiente.
- Estudiar un sistema de gestión global de explotación de los recursos hídricos que asegure la adquisición del agua producida por desalación, puesto que, de lo contrario, las amortizaciones de la planta encarecerán más su coste. El estudio debe ser liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y en él deben participar las cuencas y las empresas suministradoras de aguas, realizando simulaciones de demanda de agua en función del precio para dimensionar las plantas convenientemente.
- Facilitar la interconexión entre la planta y la red eléctrica para suministrar energía a la planta de desalación y estudiar el impacto de las cargas variables sobre la red. El coste del agua obtenida por ósmosis inversa con energía eólica, funcionando de modo aislado, sería 2 €/m<sup>3</sup>; mientras que si funcionara conectada a la red para suplir el déficit energético que tuviera la planta, el coste se reduciría hasta 0,5 €/m<sup>3</sup>, cifra competitiva con la obtenida con energía adquirida en su totalidad de la red eléctrica. Se debería favorecer, también, la venta del excedente de energía, si se sobredimensiona el parque eólico para tener mayor autonomía, aplicando en el último caso los precios de adquisición que marque el Régimen Especial. Esta tarea debería ser realizada por el Ministerio de Industria Turismo y Comercio en coordinación con el Ministerio de Medio Ambiente.
- Aplicar incentivos financieros a proyectos de implantación, al igual que sucede con las energías renovables, que son apoyados por subvenciones y financiación blanda, que subvenciona tipos de interés y concede largos plazos de amortización (IDAE, ICO y comu-

nidades autónomas). Se deberían aplicar fondos FEDER a estos proyectos y líneas de financiación blandas a largo plazo del ICO, que reducirían los costes de capital y del agua desalada. Los incentivos a la implantación no eximen de la necesidad de que el proyecto cuente con estudios e informes preceptivos de impacto ambiental favorables.

- Fomentar las actividades de investigación y desarrollo que contribuyan a reducir costes, mejorar los procesos y la interconexión a la red, priorizando los consorcios con alta capacidad para la explotación de los resultados. Las ayudas para I+D+i deben ser subvenciones y créditos sin intereses, competencia de los Ministerios de Industria, Turismo y Comercio y CDTI, Ministerios de Educación y Ciencia, Medio Ambiente y Fomento y también de los departamentos de innovación de las comunidades autónomas. Se deberían aunar los esfuerzos de los diferentes organismos competentes.
- Se propone escalar las tecnologías un orden de magnitud superior a los prototipos actuales, que se beneficien de economías de escala. La capacidad de las plantas debería estar entre 2.500 m<sup>3</sup>/día y 30.000 m<sup>3</sup>/día. Los principales retos tecnológicos que deberían plantear estos proyectos son el desarrollo de:
  - Aerogeneradores multimegavatio y aerogeneradores *off-shore*.
  - Sistemas de almacenamiento de energía de bajo coste.
  - Plataformas flotantes y sistemas de cimentación en fondos marinos profundos.
  - Grandes membranas de ósmosis inversa, de alto factor de conversión y bajo consumo. Reducción de la presencia de boro en el agua producto. Pretratamientos de bajo coste y bajo impacto ambiental.
  - Reducción del consumo energético con cámaras isobáricas.
  - Mejorar la integración de redes eléctricas débiles y grandes cargas variables.
  - Integración electromecánica de sistemas de desalación con sistemas de generación eólica.
  - Mejorar el comportamiento de las plantas con fluctuaciones en la generación de energía.

El problema más general de escasez de agua debe acometerse desde una perspectiva más amplia, la desalación es sólo una parte de la solución y, como se ha comentado en el primer capítulo, hay que hacer un trabajo importante en la sensibilización de la población, la modernización de las técnicas de riego, el desarrollo de cultivos de alto valor añadido y bajo consumo de agua para zonas donde hay escasez, aplicando, si fuera preciso, subvenciones agrarias y una política de precios que incentive el ahorro de agua y evite su mal uso en temporadas de sequía.

## Índice de Tablas y Gráficos

### Tablas

Tabla 1. Grado de salinidad del agua, según su procedencia .....	7
Tabla 2. Procesos de desalación de mar: inversión, consumo energético y coste de producción .....	22
Tabla 3. Distribución de los costes de producción de aguas saladas por ósmosis inversa .....	23
Tabla 4. Centrales eléctricas: tecnología, potencia, inversión y disponibilidad .....	33
Tabla 5. Centrales eléctricas: emisiones de CO <sub>2</sub> por tipo de central .....	37
Tabla 6. Coste de generación de energía de origen renovable, por tecnologías .....	39
Tabla 7. Coste de la energía eléctrica de origen renovable en función de la inversión unitaria, la disponibilidad anual de la planta y el coste de oportunidad de la inversión .....	49
Tabla 8. Costes de producción de agua de mar desalada utilizando energía eléctrica eólica. Variación de los costes, según la disponibilidad anual de la planta eólica .....	50

### Gráficos

Gráfico 1. Capacidad mundial de desalación .....	14
Gráfico 2. Inversión de una planta de ósmosis inversa .....	22
Gráfico 3. Consumo de energía primaria en España .....	30
Gráfico 4. Generación eléctrica en España .....	31
Gráfico 5. Potencia eléctrica en España .....	32

## Bibliografía

- Arango Mesa, H., Gómez Gotor, A. (2003), Diseño de una planta desalinizadora de ósmosis inversa, parámetros y componentes principales, pp. 12-21, Ósmosis Inversa: Desalación de agua, *Tecnología del Agua*, número especial, *Reed Business Information*, Barcelona.
- Batanero Ortiz, J. M. (2004), Planta desaladora de agua de mar de Carboneras y planta desaladora de El Atabal. Desalación' 04, Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Birol, F. (2005), WEO-2004 Alternative Policy Scenario Seeds for a Manifesto, Workshop Policies to Share an Alternative Energy Future, IEA, 25 de mayo de 2005.
- Blanco, J., Alarcón, D. (2002), Innovative Ideas to Reduce Current Cost of Solar Seawater Desalination based on MED Technology. [http://www.idswater.com/Common/Paper/Paper\\_46/Julian%20Blanco%20Desalination.pdf](http://www.idswater.com/Common/Paper/Paper_46/Julian%20Blanco%20Desalination.pdf).
- Blanco, J., Alarcón, D. (2004), Tecnología Híbrida de desalación avanzada solar-gas en colectores estáticos. Desalación' 04, Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Boceta, V. (2001), Planes "hidro-ilógicos" nacionales, *Expansión Directo*, 4 de abril de 2001, <http://www.circulodeempresarios.org/circuloe/articulosce.nsf>.
- Cantó Janer, J., Luque Montilla, J. F. (2003), Potabilización de las aguas subterráneas. Aplicación de nuevas tecnologías de tratamientos en las ETAPs, pp. 78-89. Ósmosis Inversa: Desalación de agua, *Tecnología del Agua*, número especial, *Reed Business Information*, Barcelona.
- Cortada, C., Román, I. P., *et al.*, (2004), Estudio de la formación de subproductos de la desinfección en aguas destinadas al consumo público procedentes de la desalación de agua de mar, Desalación'04. Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Cruz Cruz, I. (2004), Viabilidad de la desalación de agua de mar con energía eólica, Desalación'04. Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Epp, C., Papapetrou, M. (2004), Co-ordination action for autonomous desalination units on renewable energy systems, ADU-RES, *Desalination*, 168 (2004), pp. 89-9.
- EREC (2004), Renewable Energy Scenario to 2040. 27 May 2004. [http://www.erec-renewables.org/documents/targets\\_2040/EREC\\_Scenario%202040.pdf](http://www.erec-renewables.org/documents/targets_2040/EREC_Scenario%202040.pdf).
- Esteban, A. (2005), *Infoenviro*, número 052005.
- FAO (2005), Desalinización de agua para aplicaciones agrícolas, Comité de Agricultura, 19º período de sesiones, Roma 13-16 de abril de 2005.

- García Breva, F. J. (2004), El nuevo Plan de Energías Renovables en España 2004-2010. Una propuesta plenamente justificada, *Ambienta*, septiembre 2004.
- García Rodríguez, L., Romero Ternero, V., *et al.* (2001), Economic analysis of wind-powered desalination, *Desalination* 137, pp. 259-65.
- González Sosa, L. F. (2004), Implantación de sistemas de ahorro de energía R.O. Kinetic. Desalación' 04. Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Gonzalo, M., Hablemos de nanofiltración, Ósmosis Inversa: Desalación de agua, *Tecnología del Agua*, número especial, *Reed Business Information*, Barcelona, p. 77.
- Hensel, F., Uhl, K. (2004), Low energy desalination and wind energy-sustainable solutions for drinking water production, *Desalination* 168 (2004), pp. 125-6.
- Hernández Suárez, M. (2000), Desalinización en las Islas Canarias una visión actualizada, I Congreso Nacional AEDyR, Murcia 28-29 de noviembre de 2000. <http://www.fcca.es/Docs/Desalinizacioncanarias.pdf>.
- Hernández Suárez, M. (2001a), Sobre el uso del agua desalada para riegos, Centro Canario del Agua <http://www.fcca.es/Docs/Canacua2.zip>.
- Hernández Suárez, M. (2001b), Estimación de los costes de explotación de una desaladora de ósmosis inversa de 21.000 m<sup>3</sup>/día.
- Hernández Suárez, M. (2003), Postratamientos del agua osmotizada para uso agrícola. Murcia, 27 de mayo de 2003. [http://www.fcca.es/Docs/Murciafinal\(3\).pdf](http://www.fcca.es/Docs/Murciafinal(3).pdf).
- ITC (2004), Proyecto AQUAMAC. Propuesta de acción para optimizar la autosuficiencia energética de los ciclos de agua. Entregable 3. Guía para la realización de estudios de viabilidad técnico-económica de instalaciones de aprovechamiento de la energía eólica en los ciclos del agua, Instituto Tecnológico de Canarias, 15 de julio de 2004.
- Izaguirre Etxeberria, J. K. (2004), Gestión de Recursos Alternativos pág 4-11. Ósmosis Inversa: Desalación de agua, *Tecnología del Agua*, número especial, *Reed Business Information*, Barcelona.
- Koroneos, C., Dompros, A., *et al.*, Renewable Energy Driven Desalination Systems Modelling, Grecia.
- Latorre, M. (2004), Costes económicos y medioambientales de la desalación de agua de mar, IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Tortosa 2004. [http://www.us.es/ciberico/archivos\\_acrobat/ManuelLatorre.pdf](http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/ManuelLatorre.pdf).
- Loupasis, S. (2002), Technical analysis of existing RES desalination schemes. Renewable Energy Driven Desalination Systems –REDDES- ALTENER PROGRAMME. <http://www.nad.gr/readsa/files/TechnodatabaseREDDES.PDF>.
- Malloch Brown, M. (2003), Agua pura y saneamiento para los pobres, PNUD. <http://www.undp.org/dpa/spanish/publicaciones/inforrapidas/FFwater120303S.pdf>.
- Medina San Juan, J.A. (2001), La desalación en el siglo XXI. Una aproximación a los costes reales de la desalación de aguas salobres y de mar en la agricultura, II Congreso Nacional AEDyR.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio (2005), La Energía en España 2004.

- OPTI (2002), *Energía: Tendencias Tecnológicas a Medio y Largo Plazo*, OPTI.
- Ribeiro, J. (1996), *Desalination Technology Survey and Prospects. Final Report*, Institute for Prospective Technological Studies Seville, European Commission Joint Research Centre, agosto 1996.
- Rivero Torre, P. (2004), *UNESA 2004, Energía, economía y Sociedad. Curso de formación de profesorado de enseñanza secundaria*. UIMP, 10 de septiembre de 2004. <http://www.unesa.es>.
- Sánchez, J.M. (2004), *Las desaladoras y las emisiones de CO<sub>2</sub>*, *Ambienta*, diciembre 2004.
- Sánchez Lizaso, J. L., Fernández Torquemada, Y., *et al.* (2004), *Impacto Ambiental de la Desalación. Desalación'04. Jornadas Nacionales de Desalación*, Madrid 17 y 28 de noviembre de 2004.
- Sanz Atar, J., Guerrero Gallego, L. *et al.*, *Prevención del ensuciamiento coloidal en sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración. Aplicaciones del análisis de superficies con haces de electrones*, pp.: 32-7. *Ósmosis Inversa: Desalación de agua, Tecnología del Agua*, número especial, *Reed Business Information*, Barcelona.
- Schallenberg, J. C., *The Canary Island: A world laboratory for desalination*, ITC. <http://www.islandsonline.org/island2010/PDF/Canary%20islands%20RET%20desalination.pdf>.
- Seibert, U., Vogt, G., *et al.* (2004), *Autonomous desalination system concepts for seawater and brackish water in rural areas with renewable energies-potentials, technologies, field experience, socio technical an socioeconomic impacts- ADIRA*, *Desalination* 168:29.
- Semiat, R. (2001) *Desalination: Present and Future*. International Water Resources Association. *Water International*, volumen 25, núm. 1, pp. 54-65, marzo. <http://www.iwra.siu.edu/win/win2000/win03-00/semiat.pdf>.
- Subiela, V.J., Carta, J. A., *et al.* (2004), *The SWADES Project: lessons learnt from an innovative Project*, *Desalination* 168, pp. 39-47.
- Thresher, R. (2005), *Wind Power Today*, *e-Journal USA: Global Issues*, Jun 2005 <http://usinfo.state.gov/journals/itgic/0605/ijge/thresher.htm>.
- Torres, M. (2004), *Avances Técnicos en la Desalación de Aguas*, *Ambienta*, octubre.
- Van Of, S.C.J.M.; Hashim, A., *et al.* (1999), *The effect of ultrafiltration as pretreatment to reverse osmosis in wastewater reuse and seawater desalination applications*, *Desalination* 124 (1999), pp. 231-42.
- Vivar Rodríguez, A. L. (2004), *Tecnologías, Combustibles y Objetivos Medioambientales. XVI Curso Superior de Negocio Eléctrico*. Club Español de la Energía, UNESA, Madrid 24 de enero de 2004.
- Villanueva Monzón, M., Hidalgo Nuchera, A. (2003), *El despliegue de las energías renovables en España. Necesidad de acciones de política tecnológica*, *Economía Industrial* nº 354, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- Von Gotteberg, A., Lesan, R. (2005), *Testing Large Diameter RO Elements*. EDS Newsletter Issue 22, mayo.
- Wangnick, K. (2004), *2004 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report No. 18*, junio.

Zarza, E., Blanco, M. (1996), Advanced MED solar distillation. Seven years of experience at the Platform Solar of Almería. Proc. Of Mediterranean Conference on renewable energy resources for water production, Santorini, Grecia.

Zarza Moya, E. (1998), Encuentro medioambiental almeriense. Desalación de agua mediante energías renovables. <http://www.gem.es/materiales/document/document/g01/d01204/d01204.htm>.

Zarza Moya, E. (1999), Desalación. Encuentro Medioambiental Almeriense: en busca de soluciones, Almería.

## Documentos de trabajo publicados

- 1/2003. **Servicios de atención a la infancia en España: estimación de la oferta actual y de las necesidades ante el horizonte 2010.** María José González López.
- 2/2003. **La formación profesional en España. Principales problemas y alternativas de progreso.** Francisco de Asís de Blas Aritio y Antonio Rueda Serón.
- 3/2003. **La Responsabilidad Social Corporativa y políticas públicas.** Alberto Lafuente Félez, Víctor Viñuales Edo, Ramón Pueyo Viñuales y Jesús Llaría Aparicio.
- 4/2003. **V Conferencia Ministerial de la OMC y los países en desarrollo.** Gonzalo Fanjul Suárez.
- 5/2003. **Nuevas orientaciones de política científica y tecnológica.** Alberto Lafuente Félez.
- 6/2003. **Repensando los servicios públicos en España.** Alberto Infante Campos.
- 7/2003. **La televisión pública en la era digital.** Alejandro Perales Albert.
- 8/2003. **El Consejo Audiovisual en España.** Ángel García Castillejo.
- 9/2003. **Una propuesta alternativa para la Coordinación del Sistema Nacional de Salud español.** Javier Rey del Castillo.
- 10/2003. **Regulación para la competencia en el sector eléctrico español.** Luis Atienza Serna y Javier de Quinto Romero.
- 11/2003. **El fracaso escolar en España.** Álvaro Marchesi Ullastres.
- 12/2003. **Estructura del sistema de Seguridad Social. Convergencia entre regímenes.** José Luis Tortuero Plaza y José Antonio Panizo Robles.
- 13/2003. **The Spanish Child Gap: Rationales, Diagnoses, and Proposals for Public Intervention.** Fabrizio Bernardi.
- 13\*/2003. **El déficit de natalidad en España: análisis y propuestas para la intervención pública.** Fabrizio Bernardi.
- 14/2003. **Nuevas fórmulas de gestión en las organizaciones sanitarias.** José Jesús Martín Martín.
- 15/2003. **Una propuesta de servicios comunitarios de atención a personas mayores.** Sebastián Sarasa Urdiola.
- 16/2003. **El Ministerio Fiscal. Consideraciones para su reforma.** Olga Fuentes Soriano.
- 17/2003. **Propuestas para una regulación del trabajo autónomo.** Jesús Cruz Villalón.
- 18/2003. **El Consejo General del Poder Judicial. Evaluación y propuestas.** Luis López Guerra.
- 19/2003. **Una propuesta de reforma de las prestaciones por desempleo.** Juan López Gandía.
- 20/2003. **La Transparencia Presupuestaria. Problemas y Soluciones.** Maurici Lucena Betriu.
- 21/2003. **Análisis y evaluación del gasto social en España.** Jorge Calero Martínez y Mercè Costa Cuberta.
- 22/2003. **La pérdida de talentos científicos en España.** Vicente E. Larraga Rodríguez de Vera.
- 23/2003. **La industria española y el Protocolo de Kioto.** Antonio J. Fernández Segura.
- 24/2003. **La modernización de los Presupuestos Generales del Estado.** Enrique Martínez Robles, Federico Montero Hita y Juan José Puerta Pascual.
- 25/2003. **Movilidad y transporte. Opciones políticas para la ciudad.** Carme Miralles-Guasch y Àngel Cebollada i Frontera.
- 26/2003. **La salud laboral en España: propuestas para avanzar.** Fernando G. Benavides.
- 27/2003. **El papel del científico en la sociedad moderna.** Pere Puigdomènech Rosell.
- 28/2003. **Tribunal Constitucional y Poder Judicial.** Pablo Pérez Tremps.
- 29/2003. **La Audiencia Nacional: una visión crítica.** José María Asencio Mellado.
- 30/2003. **El control político de las misiones militares en el exterior.** Javier García Fernández.
- 31/2003. **La sanidad en el nuevo modelo de financiación autonómica.** Jesús Ruiz-Huerta Carbonell y Octavio Granado Martínez.



- 32/2003. **De una escuela de mínimos a una de óptimos: la exigencia de esfuerzo igual en la Enseñanza Básica.** Julio Carabaña Morales.
- 33/2003. **La difícil integración de los jóvenes en la edad adulta.** Pau Baizán Muñoz.
- 34/2003. **Políticas de lucha contra la pobreza y la exclusión social en España: una valoración con EspaSim.** Magda Mercader Prats.
- 35/2003. **El sector del automóvil en la España de 2010.** José Antonio Bueno Oliveros.
- 36/2003. **Publicidad e infancia.** Purificación Llaquet, M<sup>a</sup> Adela Moyano, María Guerrero, Cecilia de la Cueva, Ignacio de Diego.
- 37/2003. **Mujer y trabajo.** Carmen Sáez Lara.
- 38/2003. **La inmigración extracomunitaria en la agricultura española.** Emma Martín Díaz.
- 39/2003. **Telecomunicaciones I: Situación del Sector y Propuestas para un modelo estable.** José Roberto Ramírez Garrido y Juan Vega Esquerrá.
- 40/2003. **Telecomunicaciones II: Análisis económico del sector.** José Roberto Ramírez Garrido y Álvaro Escribano Sáez.
- 41/2003. **Telecomunicaciones III: Regulación e Impulso desde las Administraciones Públicas.** José Roberto Ramírez Garrido y Juan Vega Esquerrá.
- 42/2004. **La Renta Básica. Para una reforma del sistema fiscal y de protección social.** Luis Sanzo González y Rafael Pinilla Pallejà.
- 43/2004. **Nuevas formas de gestión. Las fundaciones sanitarias en Galicia.** Marciano Sánchez Bayle y Manuel Martín García.
- 44/2004. **Protección social de la dependencia en España.** Gregorio Rodríguez Cabrero.
- 45/2004. **Inmigración y políticas de integración social.** Miguel Pajares Alonso.
- 46/2004. **TV educativo-cultural en España. Bases para un cambio de modelo.** José Manuel Pérez Tornero.
- 47/2004. **Presente y futuro del sistema público de pensiones: Análisis y propuestas.** José Antonio Griñán Martínez.
- 48/2004. **Contratación temporal y costes de despido en España: lecciones para el futuro desde la perspectiva del pasado.** Juan J. Dolado y Juan F. Jimeno.
- 49/2004. **Propuestas de investigación y desarrollo tecnológico en energías renovables.** Emilio Menéndez Pérez.
- 50/2004. **Propuestas de racionalización y financiación del gasto público en medicamentos.** Jaume Puig-Junoy y Josep Llop Talaverón.
- 51/2004. **Los derechos en la globalización y el derecho a la ciudad.** Jordi Borja.
- 52/2004. **Una propuesta para un comité de Bioética de España.** Marco-Antonio Broggi Trias.
- 53/2004. **Eficacia del gasto en algunas políticas activas en el mercado laboral español.** César Alonso-Borrego, Alfonso Arellano, Juan J. Dolado y Juan F. Jimeno.
- 54/2004. **Sistema de defensa de la competencia.** Luis Berenguer Fuster.
- 55/2004. **Regulación y competencia en el sector del gas natural en España. Balance y propuestas de reforma.** Luis Atienza Serna y Javier de Quinto Romero.
- 56/2004. **Propuesta de reforma del sistema de control de concentraciones de empresas.** José M<sup>a</sup> Jiménez Laiglesia.
- 57/2004. **Análisis y alternativas para el sector farmacéutico español a partir de la experiencia de los EE UU.** Rosa Rodríguez-Monguió y Enrique C. Seoane Vázquez.
- 58/2004. **El recurso de amparo constitucional: una propuesta de reforma.** Germán Fernández Farreres.
- 59/2004. **Políticas de apoyo a la innovación empresarial.** Xavier Torres.
- 60/2004. **La televisión local entre el limbo regulatorio y la esperanza digital.** Emili Prado.
- 61/2004. **La universidad española: soltando amarras.** Andreu Mas-Colell.
- 62/2005. **Los mecanismos de cohesión territorial en España: un análisis y algunas propuestas.** Ángel de la Fuente.
- 63/2005. **El libro y la industria editorial.** Gloria Gómez-Escalonilla.
- 64/2005. **El gobierno de los grupos de sociedades.** José Miguel Embid Irujo, Vicente Salas Fumás.
- 65(I)/2005. **La gestión de la demanda de electricidad Vol. I.** José Ignacio Pérez Arriaga, Luis Jesús Sánchez de Tembleque, Mercedes Pardo.

- 65(II)/2005. **La gestión de la demanda de electricidad Vol. II (Anexos)**. José Ignacio Pérez Arriaga, Luis Jesús Sánchez de Tembleque, Mercedes Pardo.
- 66/2005. **Responsabilidad patrimonial por daño ambiental: propuestas de reforma legal**. Ángel Manuel Moreno Molina.
- 67/2005. **La regeneración de barrios desfavorecidos**. María Bruquetas Callejo, Fco. Javier Moreno Fuentes, Andrés Walliser Martínez.
- 68/2005. **El aborto en la legislación española: una reforma necesaria**. Patricia Laurenzo Copello.
- 69/2005. **El problema de los incendios forestales en España**. Fernando Estirado Gómez, Pedro Molina Vicente.
- 70/2005. **Estatuto de laicidad y Acuerdos con la Santa Sede: dos cuestiones a debate**. José M.<sup>a</sup> Contreras Mazarío, Óscar Celador Angón.
- 71/2005. **Posibilidades de regulación de la eutanasia solicitada**. Carmen Tomás-Valiente Lanuza.
- 72/2005. **Tiempo de trabajo y flexibilidad laboral**. Gregorio Tudela Cambroner, Yolanda Valdeolivas García.
- 73/2005. **Capital social y gobierno democrático**. Francisco Herreros Vázquez.
- 74/2005. **Situación actual y perspectivas de desarrollo del mundo rural en España**. Carlos Tió Saralegui.
- 75/2005. **Reformas para revitalizar el Parlamento español**. Enrique Guerrero Salom.
- 76/2005. **Rivalidad y competencia en los mercados de energía en España**. Miguel A. Lasheras.
- 77/2005. **Los partidos políticos como instrumentos de democracia**. Henar Criado Olmos.
- 78/2005. **Hacia una deslocalización textil responsable**. Isabel Kreisler.
- 79/2005. **Conciliar las responsabilidades familiares y laborales: políticas y prácticas sociales**. Juan Antonio Fernández Cordón y Constanza Tobío Soler.
- 80/2005. **La inmigración en España: características y efectos sobre la situación laboral de los trabajadores nativos**. Raquel Carrasco y Carolina Ortega.
- 81/2005. **Productividad y nuevas formas de organización del trabajo en la sociedad de la información**. Rocío Sánchez Mangas.
- 82/2006. **La propiedad intelectual en el entorno digital**. Celeste Gay Fuentes.
- 83/2006. **Desigualdad tras la educación obligatoria: nuevas evidencias**. Jorge Calero.
- 84/2006. **I+D+i: selección de experiencias con (relativo) éxito**. José Antonio Bueno Oliveros.
- 85/2006. **La incapacidad laboral en su contacto médico: problemas clínicos y de gestión**. Juan Gervas, Ángel Ruiz Téllez y Mercedes Pérez Fernández.
- 86/2006. **La universalización de la atención sanitaria. Sistema Nacional de Salud y Seguridad Social**. Francisco Sevilla.
- 87/2006. **El sistema de servicios sociales español y las necesidades derivadas de la atención a la dependencia**. Pilar Rodríguez Rodríguez.