

## Resumen

En este artículo se examinan las líneas de investigación tecnológica más prometedoras en el campo de la energía, muy particularmente para fuentes con bajas emisiones de dióxido de carbono. Ante la necesidad de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, tanto por razones de dependencia como de disponibilidad o medioambientales, se concluye que no hay fuentes nuevas que puedan sustituir a las convencionales de forma total, por lo que es imprescindible contar con todas ellas, aumentando el uso de las que proceden de fuentes renovables, lo que implica reducir costes y resolver el problema de la intermitencia, mejorando las prestaciones de la tecnología nuclear actualmente utilizada e introduciendo técnicas de secuestro y captura de CO<sub>2</sub> para el caso del carbón, un combustible básico en la generación de electricidad.

*Palabras clave:* combustibles fósiles, electricidad renovable, energía eólica, energía solar, energía nuclear.

## Abstract

This paper outlines the most promising developments in technological research in the energy sector, in particular those related to low carbon dioxide emission sources. Given the need to reduce our reliance on fossil fuels, as far as dependency, availability and environmental reasons are concerned, we may conclude that there are no new sources that are fully able to replace the conventional ones, and for that reason, it is essential to rely on all of them, increasing our use of energy from renewable sources, which implies cost reductions and resolution of the intermittency issue, improving nuclear power sites currently in operation and introducing CO<sub>2</sub> capturing and storage techniques in the case of coal, a basic fuel for electricity generation.

*Key words:* fossil fuels, renewable electricity, wind energy, solar energy, nuclear energy.

*JEL classification:* Q42.

# PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS EN ENERGÍA

Cayetano LÓPEZ

CIEMAT y UAM

## I. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía primaria están identificadas, y no parece que su catálogo pueda ampliarse en un futuro previsible. Desde los albores de la Humanidad hasta el comienzo de la era industrial, a principios del siglo XIX, las únicas fuentes de energía primaria disponibles eran la leña y otras formas de biomasa natural, los animales de carga y el viento para el transporte marítimo o fluvial. A partir de la aparición de las primeras máquinas de vapor empieza a utilizarse como fuente de energía el carbón, que continúa hoy, y más tarde, cuando se extiende el uso del automóvil dotado de un motor de combustión interna que debe ser alimentado con un fluido combustible, el petróleo y sus derivados pasan a ocupar un lugar preeminente como fuente de energía. Finalmente, el gas natural ha ido configurándose a lo largo del último medio siglo como un componente importante en la generación de electricidad y en la producción de calor para usos industriales y domésticos.

La contribución de estos combustibles —llamados fósiles por su formación en las profundidades de la corteza terrestre a partir de restos de organismos existentes hace cientos de millones de años— al conjunto de la energía primaria consumida en el mundo a finales de 2007 (British Petroleum, 2008) es del 35,6 por 100 el petróleo, 28,6 por 100 el carbón y 23,8 por 100 el gas natu-

ral; en conjunto representan, por tanto, el 88 por 100 del total, lo que, por muchas razones, configura un escenario insostenible incluso a corto plazo. El resto proviene de la energía nuclear, que supone un 5,6 por 100 del total, y de las energías renovables, esencialmente la hidroeléctrica. Las energías procedentes del viento y del sol en sus diversas modalidades son hoy un factor marginal, aunque empiezan a tener una mayor presencia en algunos países, singularmente en España.

Sin embargo, la creciente demanda mundial de energía y los problemas asociados a los combustibles fósiles, tanto de escasez como de impacto ambiental, están en la base del creciente interés por otras fuentes de energía, o de un uso distinto de las convencionales. Me refiero a las energías renovables, a la fisión nuclear o a lo que se llama combustión limpia del carbón, con tecnologías de captura y secuestro de CO<sub>2</sub>. Pero hay todavía barreras tecnológicas que es necesario superar; en unos casos, para disminuir los precios hasta niveles aceptables en un escenario de sustitución masiva de fuentes de energía, y en otros, simplemente para alcanzar el nivel de desarrollo industrial. En particular, la fusión nuclear supondrá un gran avance cuando consigamos dominarla, pero la tecnología de fusión es tan compleja que pasará aún mucho tiempo antes de que llegue a poder ser explotada comercialmente. No me referiré a ella en lo que sigue debido, precisamente, a lo lejano de su horizonte temporal.

## II. LOS BIOCARBURANTES Y EL SECTOR DEL TRANSPORTE

El sector del transporte depende casi en su totalidad de los combustibles líquidos derivados del petróleo. La primera alternativa posible es el uso de biocarburos (bioetanol y biodiesel) que sustituyan al menos una parte de los convencionales. Pero, aun cuando la producción de biocarburos está todavía en un estadio muy incipiente, ya han surgido problemas colaterales en relación con el sector de la alimentación. Desde luego, su influencia en el aumento de los precios de los alimentos es limitada y concurre con otras causas de mayor calado, ya sean coyunturales o estructurales. En todo caso, el etanol fabricado a partir de cereales, por poner el caso más controvertido, es la peor solución posible, y no sólo por razones de impacto sobre la alimentación, sino especialmente por su escaso rendimiento energético. En efecto, la cantidad de energía contenida en un litro de etanol es apenas superior a la que es necesaria para obtenerlo a partir de cereales, en fertilizantes, semillas, cosechas, transporte y tratamiento (ver, por ejemplo, Worldwatch, 2007, o CIEMAT, 2005). Por lo tanto, desde el punto de vista energético, no es razonable utilizar esta materia prima. Hay además razones de tipo medioambiental relacionadas con el uso del agua y de tierra cultivable que apuntan en esta misma dirección (Zah *et al.*, 2007).

Por el contrario, el rendimiento energético de la caña de azúcar es muy superior, y todavía lo es más el etanol a partir de lo que se llama biomasa lignocelulósica, presente en plantas leñosas o herbáceas y en residuos orgánicos. Es lo que se llama etanol de segunda generación. Sin embargo, la

tecnología de producción de biocarburos de segunda generación no está todavía al nivel de explotación industrial. No se está muy lejos, y ya hay algunas plantas piloto en las que se están experimentando varios procesos termoquímicos o bioquímicos; no tiene efectos sobre la alimentación, incurre en menos costes energéticos y tiene menos contraindicaciones ambientales (ver, por ejemplo, Ballesteros, 2007, y Signes *et al.*, 2008). En cuanto al biodiesel de segunda generación, además de la utilización de aceites usados, parece prometedor el uso de microalgas. Pero el hecho es que en ambos casos los costes son todavía elevados y quedan problemas técnicos por resolver para aumentar la fiabilidad y eficiencia de los distintos procesos utilizados. El etanol de caña y los biocombustibles de segunda generación podrían disminuir la dependencia del petróleo en el sector del transporte, aunque no eliminarla, debido a las limitaciones en tierra cultivable y biomasa disponible en comparación con los consumos del sector.

Es más fácil sustituir los combustibles fósiles empleados en la generación de electricidad por otras fuentes, renovables o nuclear, que sustituir de forma directa los derivados del petróleo, por lo que, a más largo plazo, la tendencia apunta hacia los vehículos eléctricos. El problema aquí es el almacenamiento de electricidad, poco eficiente y muy contaminante, que actualmente se realiza en las baterías. Pero hay un intenso trabajo de investigación en nuevos dispositivos de almacenamiento orientado a la construcción de automóviles eléctricos con las prestaciones adecuadas.

En general, debe decirse que el problema del almacenamiento de energía, sea en forma de elec-

tricidad, calor, hidrógeno o cualquier otra forma, está ocupando una posición central en la investigación energética, tanto por su importancia para el futuro del sector del transporte como para solventar los problemas derivados de la intermitencia de las fuentes renovables, como veremos más adelante. Es decir, si se consigue avanzar en la tecnología de almacenamiento de electricidad (ver, por ejemplo, el trabajo de José Luis Mata Vigil-Escalera en Club Español de la Energía, 2008b), el futuro previsible de una parte importante de los vehículos será eléctrico, aunque se trata de una tarea de enorme dificultad, dadas las prestaciones del coche de gasolina. Me concentraré, por tanto, en lo que sigue en la producción de electricidad, que se configura como la forma de energía más flexible y adaptable incluso para el futuro del sector del transporte.

## III. CAPTURA Y SECUESTRO DE CO<sub>2</sub>

El esquema de producción de electricidad varía mucho de unos países a otros. Sin embargo, es un rasgo común la importante presencia del carbón como fuente primaria para generar electricidad. Para el conjunto del planeta, aproximadamente el 40 por 100 de la electricidad producida procede del carbón y, con la excepción de Francia, que se basa de forma muy destacada en su parque nuclear, y parcialmente de España, con una apreciable contribución de las renovables, la fuente de energía básica sigue siendo el carbón. Y seguirá siéndolo durante mucho tiempo debido a su abundancia y a la distribución en prácticamente todos los continentes. En un país tan desarrollado tecnológicamente como EE.UU., todavía la mitad de

la electricidad generada tiene su origen en plantas de carbón, con una tendencia creciente. En China, el carbón representa del orden del 85 por 100, y su uso es también creciente. En España, la contribución del carbón a la producción de electricidad es del orden del 24 por 100.

El carbón es, con diferencia, el combustible fósil más contaminante, ya que emite cerca del doble de dióxido de carbono a la atmósfera por unidad de energía producida que el gas natural, además de compuestos de azufre, nitrógeno y metales pesados. Así que, si queremos seguir utilizando el carbón como fuente de energía, debemos desarrollar procedimientos que eliminen o limiten las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (las otras emisiones ya se controlan en las plantas de generación actuales). Es lo que se conoce como procesos de captura y secuestro de CO<sub>2</sub> (CCS, por sus siglas en inglés), todavía en una fase muy preliminar. En particular, la captura del CO<sub>2</sub> emitido en la combustión del carbón puede hacerse con técnicas de oxidación, es decir modificando la composición del aire que entra en las calderas de forma que los gases emitidos sean CO<sub>2</sub> prácticamente puro y no haya necesidad de separarlo, con una gasificación previa que permita separarlo antes de la combustión, o bien tras la combustión en aire con técnicas de separación físicas o químicas. En ambos casos se generarán costes energéticos adicionales y requerirán de nuevos procesos probados ya en el laboratorio, pero no a la escala industrial requerida. En cuanto al secuestro, es preciso encontrar depósitos subterráneos o submarinos en los que inyectar el CO<sub>2</sub> con un grado de estanqueidad suficiente como para que dicho gas esté confinado durante siglos.

En realidad, depósitos de este tipo existen ya en la naturaleza. Por ejemplo, los yacimientos de gas natural, que lo han mantenido confinado durante periodos geológicos, una vez explotados, pueden ser utilizados para almacenar dióxido de carbono, lo mismo que yacimientos agotados de petróleo, formaciones sedimentarias salinas, etc. Incluso existen ideas sobre su mineralización mediante la conversión en carbonatos. Las experiencias de secuestro de CO<sub>2</sub> en el mundo están asociadas a campos petrolíferos en producción ya decreciente en los que se inyecta dicho gas a presión con objeto de mejorar sus prestaciones y obtener crudo que no brotaría con las tecnologías convencionales de extracción. Es el caso del yacimiento de Weyburn, en Canadá, en el que se inyecta el CO<sub>2</sub> que llega a través de un gasoducto procedente de una planta de gasificación situada en Dakota del Norte, con objeto de mejorar su rendimiento. Otra experiencia similar es la de Sleipner, un campo de producción de gas en la costa noruega del Mar del Norte en el que se deposita CO<sub>2</sub> en un lecho de rocas porosas con agua y sales a un kilómetro de profundidad.

Como puede verse, hay algunas experiencias de secuestro, pero todas están asociadas a la mejora del rendimiento de yacimientos de gas natural o petróleo, y no a evitar emisiones a la atmósfera derivadas de la utilización del carbón en la producción de electricidad. Por otra parte, la escala de estas experiencias es muy modesta, del orden de un millón de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, que debe compararse con los aproximadamente 30.000 millones de toneladas anuales emitidas en total (no todas procedentes del carbón). En todo caso, hay que destacar que los procesos de captura

y secuestro de dióxido de carbono encarecerán el precio de la energía obtenida a partir del carbón. Los expertos cifran este encarecimiento entre un 30 por 100 y un 100 por 100 del precio sin CCS (Socolow, 2005, y la Fundación para Estudios sobre la Energía, 2008). La conclusión es que no es probable que se deje de utilizar una fuente de energía tan abundante y repartida como el carbón, a pesar de sus notables efectos medioambientales. Pero para que su uso sea sostenible es de la mayor importancia encontrar una forma de contrarrestar las emisiones que actualmente se asocian a su uso.

#### IV. ELECTRICIDAD RENOVABLE

Pienso que el desafío más importante que tenemos para las próximas décadas es aumentar de forma significativa la contribución de las energías renovables distintas de la gran hidráulica, que es la que tiene una mayor presencia, y cuyos recursos han sido utilizados de forma más completa. Sus ventajas se derivan de su carácter sostenible, ilimitado, muy poco contaminante, incluso si tenemos en cuenta el ciclo completo de vida, y su distribución territorial. Los inconvenientes pueden agruparse en dos categorías: elevado coste e intermitencia.

Una de las razones del alto coste de la electricidad renovable se debe a la dispersión de este tipo de energías, que es una característica intrínseca sólo compensada por su carácter ilimitado, aunque es verosímil que mejore su comparación con las energías convencionales a medida que los costes de estas últimas vayan aumentando, debido a la disminución de las reservas y a la imputación de los costes de los efectos ambien-

tales. Otra parte del coste elevado de las renovables se debe a que la tecnología está todavía en un estadio poco avanzado de desarrollo. Para disminuir este tipo de costes, es preciso construir un mercado de dimensiones globales. Sólo así se abaratará la producción de componentes, al tiempo que podrán aplicarse mejoras en la operación y mantenimiento de las plantas renovables en condiciones de explotación industrial. Justamente, los diferentes sistemas puestos en funcionamiento para estimular el despliegue de las energías renovables están dirigidos a ampliar ese mercado mediante subsidios u otro tipo de ayudas que compensen las dificultades iniciales.

## 1. Energía eólica

Este principio se ha mostrado ya eficaz en la primera de las energías renovables que se puede considerar extendida en un mercado de dimensiones globales, la eólica. En efecto, a finales de 2008 ya existía una potencia eólica acumulada en el mundo de 121.000 MW (Global Wind Energy Council, 2008), lo que ha permitido configurar un sector industrial dinámico y en crecimiento en todas las regiones del mundo. Los tres países que cuentan con una mayor potencia instalada son Alemania, Estados Unidos y España, aunque de los tres, y debido a su menor consumo total, es España quien obtiene una mayor fracción de su electricidad de esta fuente de energía, aproximadamente un 11 por 100 en 2008, con una potencia instalada de 16.700 MW a finales de ese año. De hecho, España ocupa el segundo lugar del mundo, tras Dinamarca, tanto en fracción de electricidad total de origen eólico como en potencia instalada por habitante (European Wind Energy Association, 2008).

Los objetivos perseguidos con los estímulos públicos a la creación de un mercado eólico global están dando sus frutos no sólo en la creación de nueva actividad industrial y empleo, sino también en el abaratamiento progresivo de la energía así producida. A finales de los setenta, con aerogeneradores del orden de 50 kW de potencia y un diámetro de rotor de unos 15 m, el precio unitario era del orden de 30 a 40 c euros/kWh mientras que actualmente, con aerogeneradores de unos 2 MW de potencia, con un diámetro de rotor de cerca de 100 m, el coste de producción es sólo ligeramente más alto que el convencional.

Además del tamaño, se han producido muchas otras mejoras tecnológicas que afectan a los elementos móviles, los materiales de que están contruidos, los sistemas de conversión, transformación y evacuación, y los procesos de fabricación y montaje. No está lejos el momento en el que estas mejoras acabarán por hacer que el coste unitario de la electricidad producida iguale al de la convencional, lo que permitirá explorar nuevos territorios. En particular, el medio marino, con la llamada eólica *off-shore* debido a la mayor calidad del recurso eólico (vientos sostenidos y sin turbulencias), aunque son considerables las dificultades para el anclaje y mantenimiento de los aerogeneradores cuando la lámina de agua es profunda, así como de evacuación de la electricidad producida. Y también el entorno urbano o el de las concentraciones humanas aisladas de la red, o con una red débil, mediante la pequeña eólica.

Como ocurre con todas las renovables, está por resolver el problema de la intermitencia. El viento es discontinuo, de forma que, para el caso de España, por ejem-

plo, los parques eólicos sólo generan energía durante unas 2.000 horas al año en promedio. Y no siempre se adecua el momento de la generación con el de los máximos de la demanda. Para superar el problema de la intermitencia es preciso resolver el del almacenamiento. Para la electricidad de potencia, el sistema más simple y extendido es el bombeo de agua en presas de doble vaso, que existen en una medida insuficiente, y cuyo aumento es un factor esencial para la extensión de las energías renovables y su integración en la red. Otra forma de almacenamiento masivo menos frecuente es el aire comprimido en grandes depósitos subterráneos. En cuanto al almacenamiento electroquímico, los avances registrados en nuevas baterías para sustituir total o parcialmente los motores de explosión podrían, a la larga, contribuir también al almacenamiento de la electricidad generada en plantas renovables. En cuanto al hidrógeno, que podría ser también una alternativa de almacenamiento, su elevado coste energético sugiere que su uso no se extenderá en un futuro previsible. Cualquier progreso significativo en formas de almacenar electricidad servirá para que la energía eólica y otras renovables puedan contribuir de forma gestionable y todavía más significativa al suministro eléctrico.

## 2. Energía solar

Pero la fuente renovable más abundante, con diferencia, es el Sol. La radiación solar sobre la superficie terrestre, en un lugar como el Sur de España, equivale a la deposición de unos 1.900-2.000 kWh por metro cuadrado y por año, lo que equivale al contenido energético de 1,2 barriles de petróleo, o, lo que es lo mismo, al contenido energético de

una capa de 20 cm de petróleo. Teniendo en cuenta las enormes extensiones de tierra desértica y con buena irradiación, ello implica que la energía solar es muy abundante, aunque muy difusa. De hecho, en términos de energía primaria, la energía del Sol sobre la superficie terrestre es miles de veces mayor que la energía consumida en todo el planeta.

Hay dos formas de utilizar la energía del Sol: la primera mediante su conversión directa en electricidad utilizando dispositivos fotovoltaicos hechos de materiales que transforman la energía de los fotones solares en energía de electrones en un conductor, y la segunda mediante la transformación de la energía radiante en calor de alta temperatura y posteriormente la conversión de éste en electricidad en una turbina convencional, lo que se conoce como energía solar termoelectrica.

La energía solar fotovoltaica presenta los mismos inconvenientes que el resto de las renovables: alto precio e intermitencia. El precio se deriva del coste de la fabricación de los dispositivos fotovoltaicos, lo que se traduce en que este tipo de energía es actualmente de los más caros entre las renovables y requiere de un apoyo público considerable. Por otra parte, la tecnología fotovoltaica es una de las más versátiles y adaptables a los entornos urbanos, debido a su carácter modular y a no requerir de grandes sistemas de transformación, en contraposición con los dispositivos termoelectricos. En cuanto a su difusión, el crecimiento en la potencia total instalada en el mundo está siendo vertiginoso en los últimos tiempos. España ha jugado un papel especial en esa extensión durante los dos últimos años. En efecto, se ha pasa-

do de 150 MW a finales de 2006 a 630 MW a finales de 2007, y más de 2.600 MW a finales de 2008. Dicho incremento, que no sería sostenible en el tiempo, está asociado a la prima prevista en el Régimen Especial, y al anuncio de que la cuantía de dicha prima se revisaría a la baja en septiembre de 2008.

Actualmente, la mayor parte de los paneles instalados están compuestos de células fabricadas con oblea de silicio, cristalino o policristalino. El rendimiento medio de estos dispositivos en condiciones de campo, esto es, la fracción de la energía solar depositada sobre la superficie del material que se convierte en electricidad, es del orden del 10 por 100 al 15 por 100. Existen otras alternativas para mejorar el rendimiento o para disminuir el coste de las células fotovoltaicas. Una vía es la exploración de otro tipo de materiales y técnicas de deposición, conocidas como sistemas de lámina delgada, que utilizan también silicio, aunque en cantidades menores que en los sistemas convencionales, u otros materiales más exóticos, que mejoran la conversión fotoeléctrica. O con tecnologías multicapa, que permiten la superposición de materiales que son sensibles a diferentes frecuencias del espectro solar, con lo que se incrementa el rendimiento total. El objetivo en este apartado es encontrar materiales y procedimientos de fabricación de células que utilicen la menor cantidad posible de materiales, que éstos no sean costosos ni contaminantes y que se integren en distintas aplicaciones, por ejemplo en el ámbito de la edificación, que parecen más adaptadas a este tipo de tecnología. No obstante lo cual, se estima que todavía durante bastantes años la tecnología dominante será la convencional, basada en oblea de silicio.

Sin embargo, es probable que la mejora en las prestaciones de los sistemas fotovoltaicos tenga lugar a corto plazo gracias a las técnicas de concentración que, apoyándose en dispositivos ópticos, son capaces de hacer incidir sobre una cierta superficie de material fotovoltaico la radiación solar captada sobre una superficie mayor, con lo que aumenta su aprovechamiento. En todo caso, el objetivo fundamental de la tecnología fotovoltaica está en la disminución de costes, que son todavía muy altos en comparación con otras renovables.

Otra forma de utilizar la radiación solar para producir electricidad es mediante la tecnología termoelectrica. Se trata, en este caso, de concentrar la luz solar sobre un receptor que contiene un fluido que se calienta y posteriormente transfiere ese calor a un sistema de conversión en electricidad en una turbina convencional. Es una tecnología conocida de antiguo, simple en sus principios y robusta, que está experimentando un desarrollo notable en los últimos tiempos, especialmente en España y en Estados Unidos. En lo que sigue consideraré únicamente las dos tecnologías más extendidas, la de colectores cilindro-parabólicos y la de torre o receptor central.

En el primer caso, el calor se concentra sobre un receptor en forma de tubo por el que circula un fluido (normalmente un aceite mineral con propiedades térmicas adecuadas) que se calienta hasta una temperatura de unos 400 °C y que, en un intercambiador de calor, genera vapor a alta temperatura y presión que acciona la turbina. Durante la década de los ochenta, tras la segunda gran crisis del petróleo, se construyó en el desierto de Mojave, en California, un conjunto de plan-

tas (el complejo SECS), con una potencia total de 350 MW, que ha venido funcionando de forma satisfactoria hasta la fecha. Tras su puesta en marcha, y pasado el momento de crisis, dichas plantas no tuvieron continuación. Por otra parte, de la misma época data la fundación de la Plataforma Solar de Almería (PSA), hoy parte del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), que es un laboratorio de primera línea mundial en el que se han venido estudiando todas las tecnologías termoeléctricas, formando personal y ensayando componentes y dispositivos. La existencia de la PSA es uno de los factores que explica el liderazgo de nuestro país en este campo.

La segunda planta comercial en el mundo que utiliza colectores cilindro-parabólicos, finalizada en 2007, está situada en el desierto de Nevada, y ha sido construida y está siendo operada por Acciona. Actualmente hay proyectos para construir este tipo de plantas en España hasta una potencia probable de unos 2.000 MW en los próximos dos o tres años. Además, existen otras, en diferentes estados de gestación, hasta los 14.000 MW, y una cantidad también considerable en los Estados Unidos, en general con participación española.

En nuestro país, acaba de entrar en funcionamiento la planta Andasol I, de 50 MW, situada cerca de Guadix. Esta planta tiene una importante peculiaridad, y es que incorpora un sistema de almacenamiento, esta vez de calor, que tiene ventajas e inconvenientes cuando se compara con el de electricidad. En este tipo de plantas una parte del campo solar alimenta, mientras el sol brilla, el sistema de almacenamiento mientras el resto genera el calor que produce electricidad en la turbi-

na. Así, cuando el sol se pone y la demanda eléctrica sigue alta, es posible seguir generando electricidad a partir de la energía almacenada. En el caso de Andasol I el almacenamiento tiene capacidad para seguir trabajando a la máxima potencia durante 7,5 horas sin sol, lo que permite ajustar la entrega de electricidad a la demanda.

El almacenamiento térmico que se está ensayando en este tipo de plantas se basa en grandes cantidades de sales fundidas que almacenan calor elevando su temperatura y lo liberan cuando se enfrían. Es un sistema simple y seguro, aunque requiere movilizar, para las potencias que estamos manejando, cantidades considerables de sales. En particular, en Andasol I se utilizan 28.500 toneladas de sales. Existen otras alternativas que se irán definiendo y perfeccionando a medida que aumente nuestra experiencia en este campo.

Este tipo de energía de origen solar es también más costoso que la tradicional, aunque menos que la fotovoltaica. Y, al igual que en el resto de las renovables, es de esperar una reducción de costes a medida que el mercado se expanda. Para que esto ocurra, son precisos algunos avances tecnológicos, especialmente en la manufactura de los tubos absorbentes, al tiempo que se diversifica el mercado de proveedores, hoy tan estrecho que es difícil que se desarrollen mecanismos de competencia comercial que mejoren los procesos de fabricación. Otro de los desarrollos esperados se refiere al fluido caloportador, el aceite mineral que se utiliza actualmente, que es engorroso de manejar, contaminante y no permite elevar la temperatura de trabajo. En este sentido, existen programas de investigación avanzados cuyo propósito es la sustitución del

aceite por otro fluido que simplifique el diseño de las plantas, abaratando su coste.

Otra tecnología en desarrollo dentro del capítulo de la energía solar termoeléctrica es la que se basa en un receptor central situado en la parte superior de una torre. Un campo de helióstatos concentra la radiación solar sobre el receptor, del que se extrae el calor generado mediante algún fluido. Las primeras plantas comerciales en operación han sido construidas por Abengoa en Sanlúcar la Mayor (Sevilla), las PS-10 y PS-20, de 11 MW y 20 MW de potencia, respectivamente, y se ha iniciado la construcción en terrenos próximos a Écija, de Gemasolar, una nueva planta de torre de 17 MW con un receptor basado en principios distintos y con una capacidad de almacenamiento de 15 horas a plena potencia. Por el momento, los costes son superiores a los de la generación basada en colectores cilindro-parabólicos y está en un grado de desarrollo algo más atrasado. Pero presenta algunas ventajas como poder operar a temperaturas mayores y adaptarse a terrenos más accidentados.

## V. LA FISIÓN NUCLEAR

Junto a los combustibles fósiles y las renovables, la energía de fisión nuclear es una fuente de energía esencial hoy en los países más desarrollados. En Europa, el 30 por 100 de la electricidad producida es nuclear, siendo este porcentaje del 20 por 100 en España. La energía nuclear tiene algunas ventajas que la hacen atractiva como parte del menú energético del futuro. Las principales son la independencia de cualquier condición climática o ambiental, que permite que una planta opere un porcentaje muy elevado de las horas del año. Este hecho explica que

el sector nuclear en España, con 7.700 MW instalados, haya generado en 2007 aproximadamente el doble de la electricidad de origen eólico, que contaba, en esa fecha, con una potencia de 15.100 MW. Otro factor positivo a tener en cuenta es la relativa independencia de las oscilaciones del precio del uranio, ya que éste, a lo largo de la vida útil de la planta, supone apenas un 6 por 100 de los costes totales de construcción y operación, a diferencia de las plantas de gas, con una mucho menor inversión inicial pero con una dependencia muy superior del precio del combustible.

Por otra parte, se trata de un sector industrial con una considerable experiencia en seguridad, a pesar de la existencia de una opinión generalizada en contra. De hecho, los protocolos de seguridad más avanzados y exigentes han surgido precisamente de la industria nuclear.

Sus inconvenientes son conocidos. Desde el punto de vista económico, las enormes inversiones necesarias en la fase de construcción, con un dilatado periodo de amortización que es la contrapartida del reducido coste del combustible. Desde el punto de vista ambiental o de seguridad, la gravedad potencial de los accidentes en el funcionamiento de las plantas, aunque éstos sean escasos, y sobre todo la generación de residuos radiactivos difíciles de gestionar y custodiar. El problema de los residuos es, seguramente, el inconveniente más serio y, en la opinión pública, sin duda ha predominado sobre los aspectos más positivos de esta tecnología energética, por lo que merece una consideración especial.

Los residuos son, a grandes rasgos, de dos clases. De baja y media actividad, procedentes de

materiales activados y componentes auxiliares, con una vida media típicamente de unos 30 años y poca concentración. Para este tipo de residuos, que son los que se generan en mayor cantidad, la solución aceptada universalmente es el almacenamiento en un depósito durante el tiempo necesario para que la actividad haya disminuido hasta el nivel de la radiactividad natural de fondo. El Cabril, en Córdoba, es un ejemplo típico de este tipo de almacenamiento y, gestionado adecuadamente, sus efectos sobre el medio ambiente son inapreciables.

El problema más grave son los residuos de alta actividad, provenientes del combustible usado, algunos de ellos con una vida media muy larga, desde cientos de años a decenas o cientos de miles de años. Algunos países han optado por construir almacenamientos geológicos profundos (AGP), en condiciones de estanqueidad suficientes como para garantizar la estabilidad de los residuos depositados en periodos geológicos. Está clara la dificultad no sólo de encontrar lugares que cumplan con las condiciones físicas requeridas, sino también de aceptación por parte de la opinión pública. Otros países, como España, se orientan a construir un almacenamiento temporal centralizado (ATC) en superficie, que permita la custodia de los residuos en condiciones de seguridad durante periodos mucho más cortos, del orden de un siglo, mientras se ponen a punto técnicas de eliminación de los residuos o su transformación en materiales inertes. Y es que la gestión o eliminación de los residuos es uno de los problemas cuya resolución es más acuciante si queremos que la energía nuclear tenga un futuro. Dicha transformación se basa en lo que se conoce como técnicas de separación y transmutación, pero

su desarrollo es todavía incipiente debido a su complejidad tecnológica.

En realidad, los desarrollos asociados a la neutralización de los residuos más peligrosos están muy ligados a lo que se conoce como reactores de cuarta generación. Existen en este momento 439 reactores comerciales en funcionamiento en el mundo, de los que 104 están en Estados Unidos y 59 en Francia, con una potencia instalada de 373.000 MW, y 38 más en construcción en Finlandia, Francia, los países del Este de Europa y Asia (World Nuclear Association, 2008). Todos ellos son de segunda o tercera generación, operando con neutrones térmicos (lentos) y utilizando como combustible el isótopo  $^{235}\text{U}$ , que es muy poco abundante en la naturaleza, sólo el 0,7 por 100 del uranio natural. Las líneas más prometedoras de la cuarta generación operan con neutrones rápidos y pueden utilizar como combustible la mayoría de los residuos existentes, así como el  $^{238}\text{U}$ , que es el isótopo de uranio más abundante (el 99,3 por 100 restante) e incluso el torio, que es todavía más abundante. Los reactores de cuarta generación y los dispositivos que incorporan las tecnologías de neutrones rápidos, como los sistemas asistidos con un acelerador (ADS, por sus siglas en inglés), podrían resolver potencialmente muchos de los problemas asociados con los residuos. Y serían inmunes a una eventual escasez de combustible convencional a largo plazo (si utilizáramos todo el uranio, y no sólo su isótopo menos abundante, las reservas se multiplicarían automáticamente por un factor entre cincuenta y cien).

Los retos indiscutibles en el sector nuclear son, por lo tanto, el tratamiento de los residuos y la cuarta generación, ambos aspectos

tos relacionados desde el punto de vista de la tecnología. Pero los avances en este terreno llevan su tiempo y no estarán disponibles, en condiciones de explotación comercial, antes de veinte o treinta años, con lo que el sector nuclear, en la mayoría de los países occidentales, con las señaladas excepciones de Francia y Finlandia, se encuentra con la dificultad de un improbable resurgimiento durante todo este tiempo. En contraste, en muchos otros países del mundo, en particular en Asia, se seguirán construyendo reactores nucleares de tercera generación.

## VI. CONCLUSIONES

Ante la situación descrita en los apartados precedentes, no parece realista ni aconsejable prescindir de ninguna de las fuentes de energía disponibles, con las debidas precauciones y en los tiempos en los que la tecnología lo permita. A corto plazo, urge preparar sustitutos de los derivados del petróleo para el sector del transporte, entre los que no podemos dejar de considerar los biocombustibles de segunda generación. Respecto del carbón, que seguirá siendo una fuente abundante, aunque potencialmente muy contaminante, se impone avanzar hacia su utilización con captura y secuestro de CO<sub>2</sub>.

Pero quizás el reto más importante en estos momentos sea impulsar las energías renovables de forma que lleguen a suponer una fracción significativa del total, situación de la que estamos muy lejos hoy y en la que España ocupa

un papel de vanguardia. El viento ha demostrado sus potencialidades como fuente masiva de energía y debe seguir ampliando su presencia en el mercado global. El sol, más abundante, aunque con los problemas de dispersión ya evocados en este artículo, deberá ir ocupando en algún momento del futuro próximo el papel de energía renovable dominante, realmente masiva, sostenible e ilimitada. Para ello, habrán de resolverse los problemas tecnológicos que limitan su difusión y afectan al elevado precio que hoy tiene, y se necesitará un decidido apoyo público. Por razones de gestionabilidad de las energías renovables, y también atendiendo al futuro del sector del transporte, las tecnologías de almacenamiento de energía ocupan ya un lugar destacado en los programas de investigación energética hasta el punto de que no es concebible un esquema sostenible sin un avance significativo en este campo.

Los reactores de fisión existen, han sido probados y han evolucionado hacia diseños cada vez más seguros y con un mejor aprovechamiento del combustible. No creo que sea razonable, en una situación de crisis energética, prescindir de esta fuente de energía, aunque su supervivencia depende en gran medida de la percepción pública. A corto plazo, el problema se plantea en términos de prolongación de la vida útil de los reactores existentes y de su reemplazamiento por otros de generación III; sin embargo, el desafío fundamental en este apartado es el avance hacia los reactores rápidos de ge-

neración IV, que permitirán reciclar los residuos y utilizarán el combustible de forma óptima.

## BIBLIOGRAFÍA

- BALLESTEROS, M. (2007), «Estado del desarrollo tecnológico de los biocombustibles», *Energía*, vol. 202: 24-28.
- BRITISH PETROLEUM (2008), *BP Statistical Review of World Energy*, junio.
- CIEMAT (2005), *Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte*.
- CLUB ESPAÑOL DE LA ENERGÍA (2008<sup>a</sup>), *Balance Energético de 2007 y Perspectivas para 2008*, Madrid.
- (2008b), *Energía: Las tecnologías del Futuro*.
- EUROPEAN COMMISSION (2007), *The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*.
- EUROPEAN PHOTOVOLTAICS INDUSTRY ASSOCIATION (2008), *Solar Generation V*, septiembre.
- EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (2008), [www.ewea.org](http://www.ewea.org).
- FUNDACIÓN PARA ESTUDIOS SOBRE LA ENERGÍA (2008), *El futuro del carbón en la política energética española*, Madrid.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2008), *Global Wind 2007 Report*.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2006), *World Energy Outlook*.
- (2008), *Key World Energy Statistics*.
- SIGNES, V. et al. (2008), «Procedimiento para la revalorización energética de la fracción orgánica de residuos orgánicos e instalación». Solicitud de patente internacional ES2008/000077.
- SOCOLOW, R. H. (2005), «Can we bury global warming?», *Scientific American*, Julio: 39-45.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2008), [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org), Septiembre de 2008.
- WORLDWATCH INSTITUTE (2007), *Biofuels for transport*, Earthscan.
- ZAH, R. et al. (2007), *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*, Empa, St. Gallen, Suiza.