

Hacia un nuevo mix energético: tecnología y sostenibilidad

Cayetano López Martínez

Catedrático de Física Teórica de la UAM. Director General del CIEMAT

DEPENDENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD

La energía es un ingrediente esencial en la vida de las sociedades humanas, y un nivel mínimo de disponibilidad es condición necesaria de bienestar. 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 siendo una importante fuente primaria y, más tarde, cuando se extiende el uso del automóvil dotado de un motor de combustión interna, el petróleo y sus derivados pasan a ocupar un lugar preeminente como fuente de energía. Finalmente, el gas natural ha ido configurando-

se 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 es del 35% el petróleo, 29% el carbón y 24% el gas natural; en conjunto representan, por tanto, el 88% 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 5,5% 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 elemento marginal, aunque empiezan a tener una ma-



yor presencia en algunos países. Por ejemplo en España, donde las renovables llegaron en 2009 a un porcentaje cercano al 10% de la energía primaria consumida.

Una parte importante de esta energía primaria, del orden del 40% en España, se convierte en electricidad, mientras que el resto se dedica al sector del transporte y la generación de calor para la industria y los hogares. La estructura de la generación de electricidad varía mucho según los países. De forma global, la mitad procede de la combustión del carbón, que es la fuente de energía que más está creciendo en términos globales. Hay países como China o Polonia, en los que el carbón representa del orden del 80% de la electricidad generada, situándose en un 50% en Estados Unidos, mientras que en Francia es de origen predominantemente nuclear. En España, la generación de electricidad está bastante diversificada, habiéndose alcanzado en 2009 un 26% procedente de renovables, con los ciclos combinados de gas natural aportando hasta cerca de un 30%, el carbón un modesto 13% y la nuclear un 18%.

La enorme preponderancia de los combustibles fósiles en el suministro de energía primaria es un problema que afecta al conjunto del planeta. Las dificultades que plantean estos combustibles se derivan en primer lugar de su distribución territorial fuertemente concentrada, con la excepción del carbón, en unos pocos países de los que dependen todos los demás para su aprovisionamiento de energía. Además, y debido al propio proceso de formación en tiempos y estructuras geológicas, son de naturaleza limitada y no renovable. Y fuertemente contaminantes como consecuencia de la emisión a la atmósfera de partículas nocivas y gases, muy en especial de dióxido de carbono, que es uno de los principales gases de efecto invernadero. Como se sabe, la concentración de estos gases en la atmósfera es determinante en los intercambios de energía solar entre la Tierra y su entorno, uno de los factores básicos en la evolución del clima global. La disminución relativa de los combustibles fósiles en favor de otro tipo de fuentes de energía que carezcan de estos inconvenientes

es, en consecuencia, una exigencia de sostenibilidad, tanto económica como ambiental.

LA DEPENDENCIA ENERGÉTICA DE ESPAÑA

España comparte este problema con el resto de los países, pero de forma aún más aguda. En efecto, en nuestro país no existen yacimientos de hidrocarburos, aunque sí de algo de carbón, y de no muy buena calidad; tampoco nuestra red fluvial y las condiciones climatológicas permiten un aumento significativo de los recursos hidroeléctricos. A lo que hay que añadir una estructura de transporte de mercancías, basado casi de forma exclusiva en la carretera y, por tanto, en los carburantes derivados del petróleo. Todo ello hace que nuestra dependencia energética del exterior sea del orden del 78% en términos de energía primaria, muy por encima de la media europea. Una mayor seguridad de nuestro suministro energético requiere, por tanto, el aumento relativo de las fuentes autóctonas.

El vector básico de los cambios en la estructura del suministro energético, por razones de independencia y de sostenibilidad, debe ser la pérdida de presencia de los combustibles basados en el carbono en favor del resto de las fuentes de energía, renovables, de forma destacada, y nuclear, en particular si se consigue dominar la tecnología de reactores de cuarta generación. El carbón, por su parte, es muy abundante y repartido, de forma que no es previsible una disminución drástica de su uso como combustible, por lo que, para ser consecuentes con la tendencia a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono, habría que desarrollar y aplicar los procesos de captura y secuestro de dicho gas.

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 que hoy no tienen. En particular, la fusión nuclear supondrá un gran avance cuando consigamos dominarla,



En España, en particular, estaban operativos a finales de 2009 19.100 MW eólicos, lo que supuso, según Red Eléctrica Española, un 13% de la demanda total de electricidad con puntas de producción de hasta el 50%.
Foto: Roberto Anguita.

pero 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.

ELECTRICIDAD DEL VIENTO

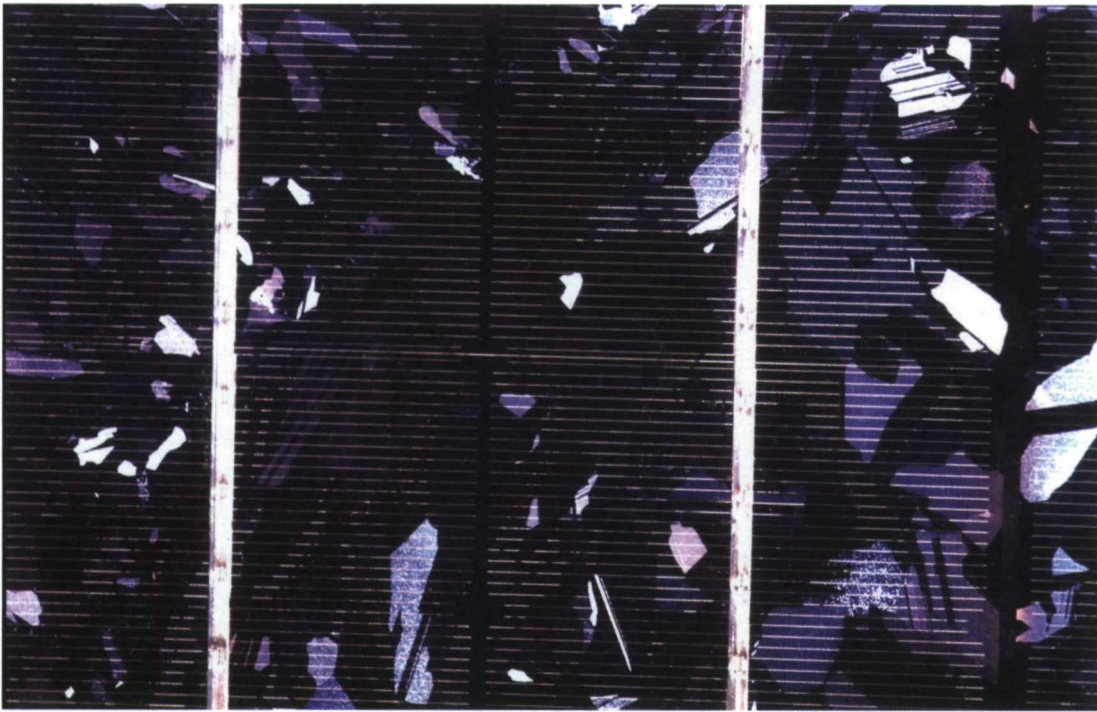
En el objetivo de disminuir nuestra dependencia de los combustibles fósiles, el desafío más importante en las próximas décadas es aumentar de forma significativa la contribución de las energías renovables distintas de la gran hidráulica, que es la que tiene una mayor presencia y cuyos recursos han sido utilizados de forma más completa. Las ventajas de las energías de origen renovable son claras: sostenibles, no contaminantes o menos contaminantes que las convencionales, autóctonas, generadoras de empleo local y de tecnología propia que puede ser exportada, y elemento dinamizador de sectores industriales de futuro como veremos más adelante. Pero también tienen inconvenientes. Éstos pueden agruparse en dos categorías, las asociadas a su precio comparativamente alto y la intermitencia que se deriva de su propia naturaleza.

La energía de origen renovable es, en estos momentos, más cara que la de origen convencional. Y esto se debe, por un lado, a que son más difusas, estando su grado de concentración energética muy lejos de la que presentan los combustibles fósiles y necesitando, en general, de grandes superficies de terreno. Pero también se debe a que las tecnologías que permiten convertirla en energía comercial están en un estadio todavía poco avanzado, con un largo recorrido de mejora tecnológica por delante que dismi-

nuya los precios. Finalmente, la ausencia de un mercado global de suficiente dimensión, impide que se pongan en marcha los mecanismos de producción en serie de componentes e instalaciones y mejora de procesos industriales asociados a la competencia entre empresas. Sobre estos factores puede y debe actuar la administración pública contribuyendo a crear ese mercado masivo y apoyando las primeras etapas del desarrollo tecnológico que, de otra forma, se convertirían en un obstáculo infranqueable para su desarrollo. A los problemas derivados del carácter intermitente de las energías renovables me referiré más adelante.

Los sistemas que el sector público tiene para apoyar el desarrollo de las energías renovables son muy variados. De hecho, cada país ha escogido un cierto conjunto de instrumentos para materializar este apoyo. En España se ha optado por el del régimen tarifario especial, que consiste, para el caso de la producción de electricidad, en el pago de una prima a los productores de energías renovables por encima del precio de mercado fijado en cada momento, aunque no se excluye que se utilicen otras fórmulas en el próximo futuro. Este sistema ha sido vital para el despliegue de la energía eólica en muchos países y muy particularmente en España. Un despliegue en el que han evolucionado de forma paralela los avances técnicos y el aumento del tamaño de los aerogeneradores, por un lado, y la consolidación de un verdadero mercado global, por otro; mercado que ha alcanzado, a finales de 2008, los 121.000 MW de potencia eólica instalada, a comparar con los 374.000 MW de potencia nuclear, y con un considerable ritmo de crecimiento. En España, en particular, estaban operativos a finales de 2009 19.100 MW eólicos, lo que supuso, según

La mejora en las prestaciones de los sistemas fotovoltaicos tenga lugar a corto plazo gracias a las técnicas de concentración. En todo caso, el objetivo fundamental de la tecnología fotovoltaica está en la disminución de costes, que son todavía altos en comparación con otras renovables, aunque disminuyen con notable rapidez



El objetivo fundamental de la tecnología fotovoltaica está en la disminución de costes, que son todavía altos en comparación con otras renovables aunque disminuyen con notable rapidez. Foto: Roberto Anguita.

Red Eléctrica Española, un 13% de la demanda total de electricidad con puntas de producción de hasta el 50%. Al mismo tiempo, se ha generado un potente sector industrial que cubre todos los subsectores, desde la fabricación de aerogeneradores hasta la explotación de instalaciones eólicas, conformándose como uno de los más potentes del mundo. Los aerogeneradores fabricados por algunas empresas españolas, con Gamesa a la cabeza, se venden en todo el mundo, mientras que Iberdrola es hoy la primera empresa del mundo que promueve y explota parques eólicos, con instalaciones en muchos países, principalmente en Estados Unidos y España.

El freno más importante a la expansión del sector eólico en España, en lo que a producción de electricidad se refiere y dejando aparte los aspectos regulatorios, es el carácter intermitente que comparte con el resto de las energías renovables. La curva de demanda eléctrica responde a los ciclos de actividad social y económica. Sin embargo, la generación de electricidad a partir del viento sigue pautas completamente distintas, hasta el punto de que, a pesar de tener prioridad en la incorporación a la red como energía fluyente que es, ya se han presentado ocasiones

en que ha sido preciso desconectar aerogeneradores por exceso de producción en momentos de demanda mínima. Lo contrario, ausencia de viento cuando la demanda es alta, ocurre con frecuencia. La solución a este problema pasa por la posibilidad de almacenar energía, de forma que puedan acompañarse demanda y producción.

El almacenamiento de energía emerge, por tanto, como un problema básico en la utilización de las fuentes renovables. La tecnología más extendida actualmente, y prácticamente la única con posibilidades de ser utilizada masivamente en estos momentos, es el bombeo en plantas hidroeléctricas de doble vaso. Existen en nuestro país actualmente unos 2.700 MW de bombeo puro en distintos embalses, una cifra a todas luces insuficiente para cubrir ya la variabilidad asociada al sector eólico, y lo será más todavía a medida que éste se expanda y se incorporen a nuestra estructura de producción nuevas fuentes renovables. Urge, por tanto, como primera medida, incrementar la capacidad de almacenamiento por bombeo.

Como es sabido, existen grandes esperanzas, y considerables desarrollos ya a nivel pre-indus-



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.
Foto: Roberto Anguita.

trial, de vehículos eléctricos, cuya finalidad primera es disminuir nuestra dependencia de los combustibles líquidos derivados del petróleo. El factor esencial en su avance es el del almacenamiento de electricidad en nuevas baterías, así como un sistema inteligente y amigable de recargarlas utilizando los valles de demanda, lo que implica gestionar precios y puntos de carga. Toda solución al almacenamiento de electricidad contribuirá a hacer posible una mayor presencia de las energías renovables, pero la misma existencia de coches eléctricos que puedan cargarse durante el tiempo en el que menos demanda hay para otros fines es ya una forma eficaz de almacenamiento, permitiendo rellenar los valles de la curva de demanda y hacerla más plana, incluso modificarla de forma inteligente de acuerdo con la producción efectiva de electricidad en cada momento. Así, el vehículo eléctrico podría disminuir nuestra dependencia del petróleo y también hacer más fácil la gestión de las energías renovables en la red.

ELECTRICIDAD SOLAR

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 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, resulta 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 termoeléctrica.

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, que está disminuyendo de forma notable debido a la entrada de nuevos países, en especial China, en el sector de la producción de paneles. 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 ni refrigeración, en contraposición con los dispositivos termoeléctricos. 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 pasado de 150 MW a finales de 2006 a 630 MW a finales de 2007, y más de 3.200 MW a finales de 2008. Dicho incremento, que no sería sostenible en el tiempo, está asociado a la prima prevista en el Régimen Especial. La revisión a la baja de dicha prima y la imposición de cupos de instalación ha hecho que durante 2009 la potencia instalada no haya variado de forma sustancial. En este año, según Red Eléctrica, la energía fotovoltaica ha cubierto ya un 3% de la demanda, porcentaje no alcanzado en ningún otro país del mundo.

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% al 15%. 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. El objetivo en este apartado es encontrar materiales y procedimientos de fabricación de células que utilicen la menor cantidad posible de material, que éste no sea costoso ni contaminante, y que se integren en distintas aplicaciones, por ejemplo en el ámbito de la edificación, que parecen más adaptadas a este tipo de sistemas. 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, gracias a 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 altos en comparación con otras renovables, aunque disminuyen con notable rapidez.

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. El futuro, a largo plazo, dependerá de la rapidez con que se avance hacia el vehículo eléctrico

Otra forma de utilizar la radiación solar para producir electricidad es mediante la tecnología termoeléctrica. 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.

De acuerdo con las conclusiones de un informe de mediados de 2009 debido a un instituto norteamericano especializado en energía llamado Emerging Energy Research, España está en el epicentro del despliegue de la energía solar de concentración en el mundo, despliegue que se está concretando principalmente en España y en Estados Unidos. A decir verdad, no hay muchos sectores de tecnología, si es que hay alguno, en los que pueda decirse lo mismo. Pero es un hecho, y se debe a la confluencia de la voluntad política de las autoridades, la existencia de empresas de carácter emprendedor que se han mostrado dispuestas a invertir y tomar riesgos en este sector y, finalmente, a la existencia de un laboratorio de primer nivel mundial, la Plataforma Solar de Almería, del CIEMAT, que ha creado un entorno óptimo para el desarrollo de nuevas tecnologías, el ensayo y la mejora de componentes, la formación de técnicos e ingenieros y una cooperación abierta y estable con el sector industrial. Sin estos tres ingredientes, incluyendo la existencia de la instalación en la que ahora nos encontramos, no habría sido posible ocupar este papel prominente en un campo de gran futuro.

Ello ha permitido que las empresas españolas ocupen el liderazgo indiscutible en la construcción y operación de este tipo de plantas en el mundo. Así, las primeras plantas de nueva generación han sido la de Acciona en el desierto de Nevada, con colectores cilindro-parabólicos, y las plantas PS-10 y PS-20, de Abengoa, en Sanlúcar la Mayor (Sevilla), de receptor central o torre. Actualmente hay ya 330 MW instalados

y a finales de este año de 2010 habrá unos 800 MW, con una previsión de 2.300 MW para finales de 2013, algo también único en el mundo.

La irrupción de la energía solar termoeléctrica planteará con mayor agudeza todavía el problema de la intermitencia de las fuentes renovables y la necesidad de avanzar en el almacenamiento de energía. Por el momento, muchas de las plantas en construcción o en proyecto disponen de un almacenamiento térmico (se almacena el calor antes de su transformación en electricidad) de varias horas a la potencia máxima. Con este nivel de almacenamiento, la instalación se convierte en gestionable y desaparecen muchos de los inconvenientes asociados a la intermitencia. Justamente, una de las plantas en funcionamiento es Andasol, situada cerca de Guadix, propiedad de Cobra-ACS y construida por Sener, que tiene la importante peculiaridad de incorporar un sistema de almacenamiento de calor. 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 turbina. 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, 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. Existen otras alternativas que se irán definiendo y perfeccionando a medida que aumente nuestra experiencia en este campo. Por otro lado, el almacenamiento encarece la inversión y, por tanto, el coste de la electricidad producida pero, al tiempo, permite una gestión más inteligente de las ventas de electricidad entrando en el sistema cuando la demanda es máxima y el precio más alto.

Esta energía de origen solar es también más costosa que la convencional. 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 absorbedores y receptores centrales. 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.

LOS BIOCARBURANTES Y EL SECTOR DEL TRANSPORTE

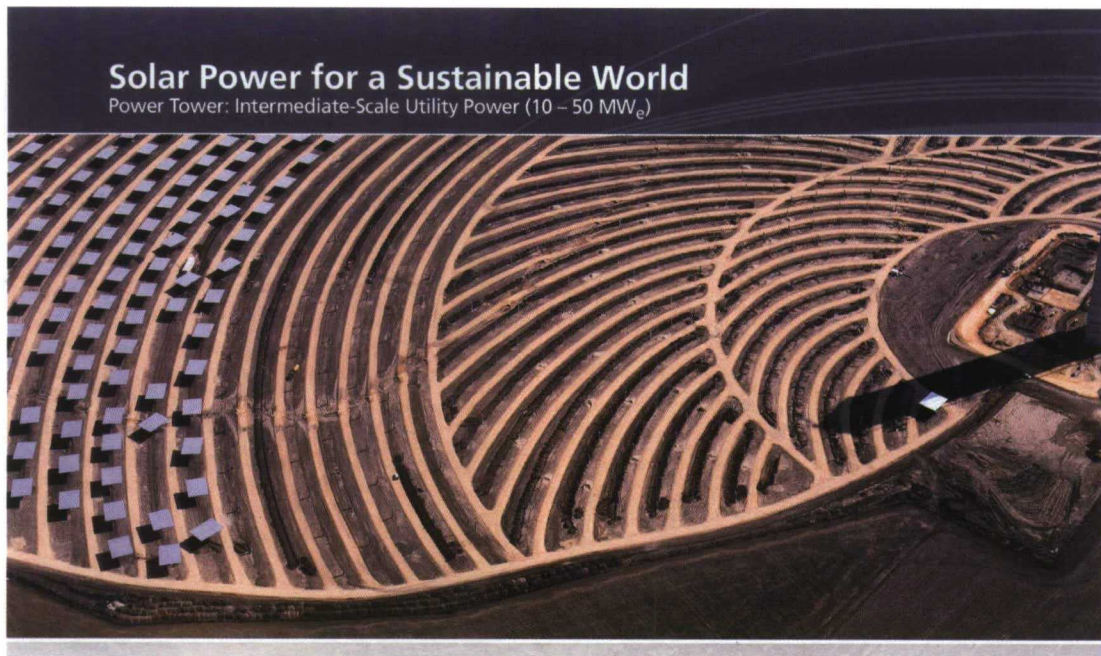
El sector del transporte depende casi en su totalidad de los combustibles líquidos derivados del petróleo. La primera alternativa posible es el uso de biocarburos, bioetanol y biodiesel, que sustituyan al menos una parte de los convencionales. Pero, aun cuando la producción de biocarburos está todavía en un estadio muy incipiente, ya han surgido problemas colaterales en relación con el sector alimentario. En todo caso, el etanol fabricado a partir de cereales, por poner el caso más controvertido, es la peor solución posible, no sólo por razones de impacto sobre la alimentación, sino por su escaso rendimiento energético. En efecto, la cantidad de energía contenida en un litro de etanol es apenas superior a la que es necesario gastar

para obtenerlo a partir de cereales, en fertilizantes, semillas, cosechas, transporte y tratamiento. Por lo tanto, desde el punto de vista energético no es razonable utilizar este tipo de materia prima. Hay además razones de tipo medioambiental relacionadas con el uso del agua y de tierra cultivable que inciden en esta misma dirección.

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. 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. No está claro, además, cuál será la alternativa tecnológica, entre las que se están desarrollando actualmente, que se consolidará como de aplicación industrial a gran escala. 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

La captura del CO₂ emitido en la combustión del carbón puede hacerse con técnicas de oxidación, 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 exigirá la puesta en marcha de nuevos procesos probados ya en el laboratorio, pero no a la escala industrial requerida

España está en el epicentro del despliegue de la energía solar de concentración en el mundo. Solucar 2 de Abengoa en Sanlúcar La Mayor. Foto Abengoa.



Solar Power for a Sustainable World

Power Tower: Intermediate-Scale Utility Power (10 – 50 MW_e)

PS20 under construction in Spain

Los problemas básicos en el sector nuclear son, el tratamiento de los residuos y la cuarta generación, ambos aspectos 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

y biomasa disponible en comparación con los consumos del sector. El futuro, a largo plazo, dependerá de la rapidez con que se avance hacia el vehículo eléctrico.

CAPTURA Y SECUESTRO DE CO₂

La producción de electricidad depende en un grado considerable del carbón como fuente primaria. Y, tal como señalé en la introducción, esto seguirá siendo así durante mucho tiempo debido a su abundancia y a la distribución en prácticamente todos los continentes.

Pero 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. Así que, si queremos seguir utilizando el carbón como fuente de energía, debemos desarrollar procedimientos que eliminen o limiten las emisiones asociadas de CO₂ a la atmósfera. Es lo que se conoce como procesos de captura y secuestro de CO₂ (CCS, de sus siglas en inglés), todavía en una fase muy preliminar. En particular, la captura del CO₂ emitido en la combustión del carbón puede hacerse con técnicas de oxi-

combustión, es decir modificando la composición del aire que entra en las calderas de forma que los gases emitidos sean CO₂ 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 exigirá la puesta en marcha de nuevos procesos probados ya en el laboratorio pero no a la escala industrial requerida. En cuanto al secuestro, es preciso encontrar depósitos subterráneos en los que inyectar el CO₂ con un grado de estanqueidad suficiente como para que dicho gas esté confinado durante siglos.

En realidad, depósitos de este tipo existen 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 CO₂ 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, por ejemplo, del yacimiento de Weyburn, en Canadá, en el que se inyecta el CO₂ que llega a través de un gasoducto procedente de una planta de gasificación situada en Dakota del Norte, con objeto de mejorar su rendimiento.

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 CO₂ al año, que debe compararse con los aproximadamente 30.000 millones de toneladas anuales emitidas en total (no todas procedente del carbón). En todo caso, hay que remarcar 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% y un 100% del precio sin CCS. 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.

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% de la electricidad producida es nuclear, siendo este porcentaje del 18% 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 2009 aproximadamente un 50% más de electricidad que el eólico que contaba, en esa fecha, con una potencia de 19.100 MW. Otro factor positivo a tener en cuenta es la relativa independencia de las oscilaciones del precio del uranio, ya que éste, a la largo de la vida útil de la planta, supone apenas un 6% 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.

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.

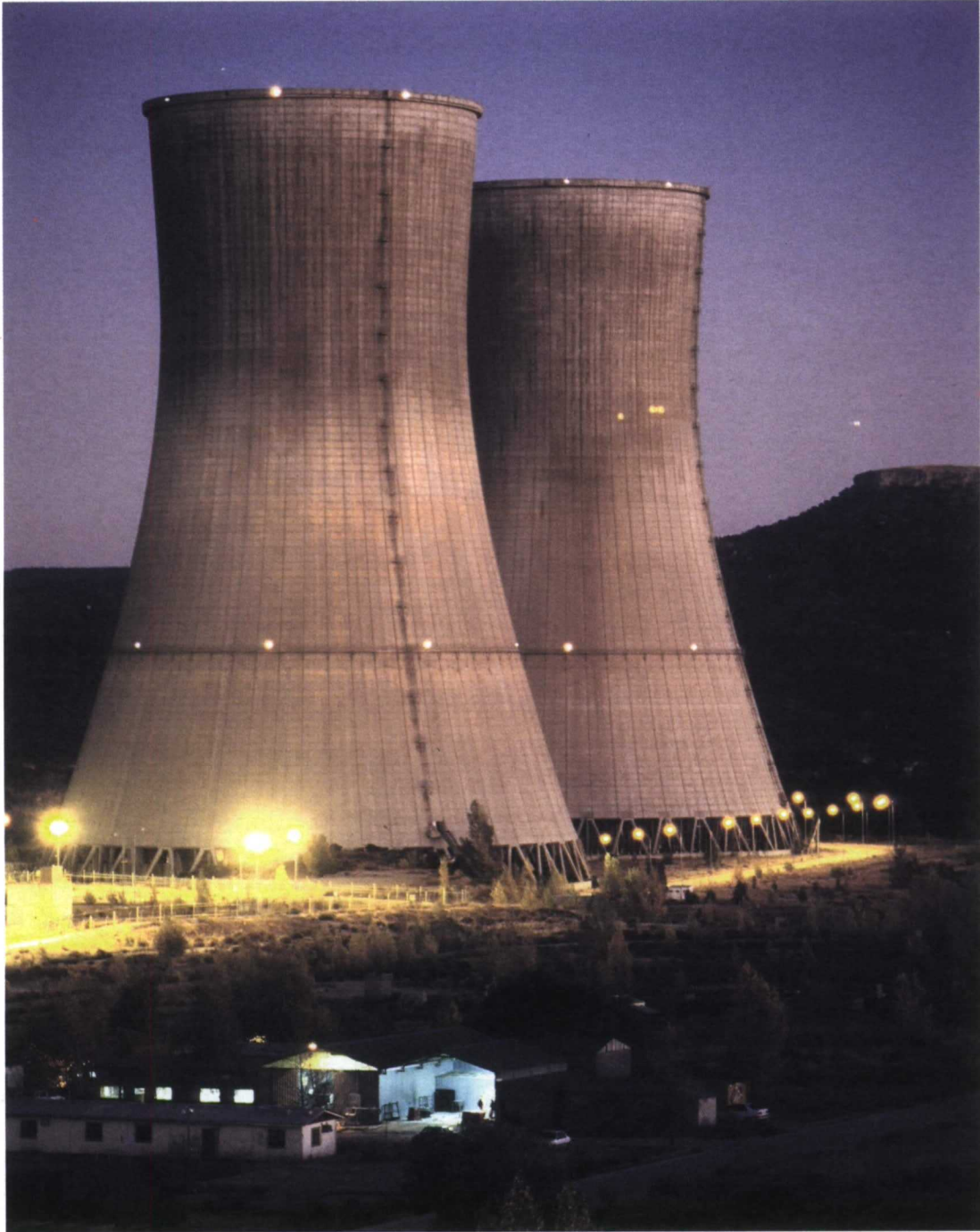
Los residuos son, a grandes rasgos, de dos clases. De baja y media actividad, procedentes de materiales activados y componentes auxiliares, con una vida media típicamente de unos 30 años y poca concentración. Para este tipo de residuos, que son los que se generan en mayor cantidad, la solución aceptada 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 Almacenes 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 una gran parte de los mismos. 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 unos 40 más en construcción en Finlandia, Francia, los países del este de Europa y Asia. Todos ellos son de segunda o tercera generación, operando con neutrones térmicos (lentos) y utilizando como combustible el isótopo ^{235}U , que es muy poco abundante en la naturaleza, sólo el 0,7% 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}U , que es el isótopo de uranio más abundante (el 99,3% 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 de 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.

No parece realista ni aconsejable prescindir de ninguna de las fuentes de energía disponibles. Sin embargo, el principio que debe orientar la transformación del mix energético es el de la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y el aumento asociado de las otras fuentes de energía



En Europa el 30% de la electricidad producida es nuclear, siendo este porcentaje del 18% en España.
Foto: Roberto Anguita.

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

CONCLUSIONES

Ante la situación descrita en los párrafos precedentes, no parece realista ni aconsejable prescindir de ninguna de las fuentes de energía disponibles. Sin embargo, el principio que debe orientar la transformación del mix energético es el de la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y el aumento asociado de las otras fuentes de energía.

A corto plazo, es esencial 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 más arriba, 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, mediante dispositivos térmicos, mecánicos o electroquímicos, 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.

El carbón seguirá siendo una fuente abundante aunque potencialmente muy contaminante, por lo que se impone avanzar hacia su utilización con captura y secuestro de CO₂.

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 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 mantenimiento de la potencia existente y eventual prolongación de la vida útil de los reactores en operación que reúnan las condiciones de seguridad exigidas; sin embargo, el desafío fundamental en este apartado es el avance hacia los reactores rápidos de generación IV que permitirán reciclar la mayor parte de los residuos y utilizarán el combustible de forma óptima.

Por último, es preciso tener en cuenta el papel de la opinión pública en materia energética. No hay conciencia suficiente del valor de la energía, de las dificultades que pueden aguardar a las futuras generaciones si seguimos despilfarrándola, y de los problemas ambientales asociados a su consumo. En este sentido, el ahorro energético deberá ser la fuente más abundante, barata y limpia de energía en el próximo futuro, aunque sólo es de aplicación a los países más desarrollados, no a la mayoría, que tienen escasez de todo, incluida la energía. Como también se irán imponiendo regulaciones que estimulen su uso eficiente en el transporte y en los sectores doméstico e industrial. ❀

El ahorro energético deberá ser la fuente más abundante, barata y limpia de energía en el próximo futuro, aunque sólo es de aplicación a los países más desarrollados, no a la mayoría, que tienen escasez de todo, incluida la energía. También se irán imponiendo regulaciones que estimulen su uso eficiente en el transporte y en los sectores doméstico e industrial