

retos actuales de la energía

CAYETANO LÓPEZ

Introducción

La creciente demanda mundial de energía y los problemas, tanto de escasez como de impacto ambiental, asociados a las fuentes convencionales están en la base de una muy probable crisis energética en las próximas dos o tres décadas. En efecto, el petróleo será cada vez más caro y escaso, mientras que los efectos climáticos de la utilización masiva del conjunto de las fuentes fósiles serán ya evidentes. Al tiempo, la vida útil del parque nuclear actual habrá llegado a su fin y no está claro, en particular en Europa, si la potencia instalada que dejará entonces de estar operativa se reemplazará con nuevos dispositivos nucleares.

En este horizonte temporal no se puede prescindir de ninguna de las fuentes de energía existentes, con las modificaciones que sean imprescindibles para eliminar o amortiguar sus efectos ambientales, y hay que incorporar nuevas fuentes, especialmente las renovables. En lo que sigue, haré una descripción del estado de las tecnologías a nuestra disposición y los desarrollos más prometedores en cada una de ellas, siempre en la perspectiva temporal de unas pocas décadas.

A más largo plazo, la fusión nuclear será parte de un catálogo más sostenible de fuentes energéticas, pero no estará lista en el periodo de tiempo considerado y, por tanto, no podrá contribuir a solventar la crisis. Ésa es la razón de que no dedique un apartado a la fusión nuclear,

que es un potente e interesante programa que se desarrolla a escala mundial y cuyo objetivo es el dominio de las reacciones de fusión nuclear como fuente de energía, pero cuyos ritmos previsibles la sitúan fuera del espacio temporal elegido para analizar los problemas energéticos.

Energía y civilización

La energía es un ingrediente fundamental en la vida de la humanidad. No hay proceso industrial, agrícola, sanitario, doméstico o de cualquier otro tipo que no requiera un aporte de energía exosomática. Los seres humanos consumimos, a través de los alimentos, unas 2.500 kilocalorías por día, mientras que, en los países industrializados, la cantidad de energía suplementaria (exosomática) que se consume, por término medio, en el conjunto de las actividades humanas –industriales, domésticas, transporte u otras– es el equivalente de 125.000 kilocalorías por persona y día, es decir cincuenta veces más, llegando en el caso de Estados Unidos al doble de esta cifra (véase, por ejemplo, British Petroleum 2008). De hecho hay una fuerte correlación entre el consumo de energía unitario y la prosperidad de las distintas sociedades.

Si se representa, como en la figura 1, cada país en un diagrama en el que el eje Y especifica el Índice de Desarrollo Humano (IDH) para ese país, tal como lo determina la ONU a partir de los datos básicos de bienestar de sus habi-

tantes, y el eje X el consumo anual de energía per capita (en este caso en forma de electricidad), se observan dos fenómenos interesantes. En los países más pobres, la correlación es muy fuerte, suponiendo el aumento del consumo energético ganancias evidentes en su IDH, mientras que para los países más desarrollados las diferencias en el consumo energético, que son muy grandes, no repercuten de forma significativa en su nivel de bienestar. Lo que implica que para estos últimos el ahorro energético es una política posible y deseable; en realidad el ahorro es la fuente de energía más limpia y abundante en el grupo de los países más prósperos. Por el contrario, el necesario desarrollo económico y social de los países comparativamente pobres, que suponen la parte mayoritaria de la población mundial, requerirá inevitablemente de un mayor consumo de energía, con lo que es poco realista pensar que el consumo global de energía va a disminuir en el futuro. Si lo hiciera, supondría una verdadera catástrofe para los países menos desarrollados, que tienen escasez de todo, también de energía. Así, aunque las políticas activas deban ir encaminadas en los países del primer mundo de forma preferente al ahorro energético, desde el punto de vista global hay que enfrentar el problema de una demanda energética creciente.

Las fuentes de energía actuales

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 suponiendo una parte importante de la energía primaria consumida, 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.

Estos combustibles, carbón, petróleo y gas natural, se encuentran a diferentes profundidades en la corteza terrestre y se han formado en procesos a alta presión y temperatura a partir de materia orgánica, principalmente plantas y organismos marinos, de épocas geológicas pasadas. De ahí que se les conozca como combustibles fósiles. Su contribución al conjunto de la energía primaria consumida en el mundo a finales de 2007 (British Petroleum 2008) es del 35,6% el petróleo, 28,6% el carbón y 23,8% el gas natural; en conjunto representan, por tanto, el 88% del total, lo que por muchas razones, como veremos en lo que sigue, configura un escenario insostenible incluso a corto plazo. El resto proviene de la energía nuclear, que supone un 5,6% 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 desde el punto de vista global, aunque



Figura 1. El Índice de Desarrollo Humano (IDH) como función de la energía eléctrica consumida por persona y año. Elaboración propia a partir de los datos del IDH elaborados por la ONU (UN 2006) y de los datos sobre consumo eléctrico de la Agencia Internacional de la Energía (IEA 2008).

empiezan a tener una mayor presencia en algunos países, singularmente en España. Y éste es el panorama global; no hay más fuentes disponibles de energía primaria.

De esta energía primaria total, una parte importante se transforma en electricidad –en un país como España aproximadamente el 40%– mientras que el resto se dedica al sector del transporte y otros usos industriales o domésticos.

Los combustibles fósiles

La enorme predominancia de los combustibles fósiles como fuente de energía primaria tiene algunas consecuencias importantes:

En primer lugar, están repartidos de forma desigual. Las dos terceras partes de todas las reservas conocidas de petróleo, que es probablemente el combustible más difícil de sustituir, se encuentran en el subsuelo de cinco o seis países del Medio Oriente, lo que implica un grado de dependencia poco compatible con la estabilidad del suministro. El gas natural también está muy concentrado en esa zona y en los países de la antigua URSS, mientras que el carbón está más repartido por todas las regiones del planeta.

En segundo lugar, son materias primas no renovables, debido a que se han formado a lo largo de decenas o cientos de millones de años y, por lo tanto, su reposición es imposible. Por otra parte son recursos limitados. En particular, la utilización del petróleo como fuente de energía sobre la que se basa el modo de vida de los países industrializados, podría ser una breve fluctuación en la historia de la humanidad, restringida a un periodo del orden de un par de siglos.

En tercer lugar, se trata de materias primas escasas. Sobre la cantidad disponible de petróleo hay una cierta discusión, pero la mayoría de los geólogos y expertos petroleros coinciden en que, al ritmo de consumo actual, que es nada menos que unos 85 millones de barriles de petróleo diarios –lo que equivale a quemar mil barriles de petróleo por segundo–, tenemos para unos pocos decenios. Se puede argüir que la cantidad de petróleo extraído dependerá del precio y que, si éste sube, no habrá límite práctico a su producción. Pero ese argumento obvia el hecho de que cuesta cada vez más energía –en prospecciones, bombeos, tratamiento y logística– extraer petróleo de yacimientos cada vez más profundos o agotados. A mediados del siglo xx, para extraer un barril de petróleo, bastaba una fracción del orden del 1% de la energía contenida en ese mismo barril; hoy esa fracción está entre el 10 y el 15%. Cuando el gasto en energía necesario para extraer un barril de crudo se acerque al generado por la combustión de su contenido, no importará su precio: habrá desaparecido como fuente de energía primaria aunque sea útil a otros fines, especialmente en la industria petroquímica para la síntesis de multitud de compuestos básicos en casi todas las ramas de la industria y la agricultura. Las reservas probadas de petróleo, consumidas al ritmo actual dan para unos cuarenta años, mientras que

las de gas llegan a los sesenta años y las de carbón hasta un siglo y medio, aproximadamente (British Petroleum 2008). Por supuesto habrá nuevos descubrimientos y los llamados petróleos no convencionales a partir de hidrocarburos dispersos en arenas o esquistos bituminosos o en alquitranes pesados, pero hay que tener siempre en cuenta su creciente coste energético y, por lo tanto, su decreciente rendimiento neto y mayor precio. En todo caso, no se producirá una brusca discontinuidad en el suministro pasando del consumo actual a nada. Lo probable es que se produzca un aumento progresivo de precio y, a partir de cierto momento, una disminución también progresiva de consumo y producción.

Por último, sabemos que quemar combustibles fósiles supone la emisión de enormes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Este gas es uno de los que producen el efecto invernadero y, por lo tanto, contribuye al calentamiento global del planeta que, dada la rapidez del fenómeno en términos geológicos, podría desencadenar perturbaciones climáticas graves potencialmente dañinas para nuestra civilización –no para la vida, como con frecuencia se dice, ni para la vida humana, pero sí para nuestra compleja y exigente organización social.

En definitiva, nuestra actividad social se basa en el consumo de combustibles fósiles que, por motivos de escasez y medioambientales, debe limitarse en el futuro. A pesar de lo cual, el carbón seguirá siendo durante decenios una fuente de energía masiva, pero su uso sólo será tolerable si se palia la contaminación que produce.

En consecuencia, el segundo reto energético –el primero es reducir el consumo en los países desarrollados– es disminuir la contribución de los combustibles fósiles en nuestro menú.

Preparar reemplazos al petróleo

El sector del transporte depende casi en su totalidad de los combustibles líquidos derivados del petróleo. El carbón y el gas natural son hoy importantes en la producción de electricidad pero es concebible su sustitución por energías renovables o energía nuclear a largo plazo, mientras que no es fácil imaginar alternativas al uso de los derivados del petróleo en el transporte. Todas ellas pasan por cambios de enorme envergadura.

La primera alternativa posible es el uso de biocarburantes, bioetanol y biodiesel, que sustituyan al menos una parte de los carburantes convencionales. Pero muy recientemente hemos tenido oportunidad de observar los problemas colaterales que pueden surgir, especialmente en el sector de la alimentación, aun cuando la producción de biocarburantes está todavía en un estadio muy incipiente. Desde luego la influencia de la producción de bioetanol, por poner el caso más controvertido, en el aumento de los precios de los alimentos es limitada y concurre con otras causas de mayor calado, ya sean coyunturales o estructurales. El único cereal que se emplea de forma significa-

tiva en la fabricación de etanol es el maíz, mientras que el trigo y la cebada se emplea en cantidades marginales respecto de la producción total y el arroz no se emplea en absoluto. Sin embargo, los precios han aumentado en todos los casos, y de forma prominente en el caso del arroz. Por otra parte, del orden de la mitad del bioetanol producido actualmente proviene de la caña de azúcar brasileña, y no ha habido aumentos en el precio del azúcar.

En todo caso, el etanol fabricado a partir de cereales es la peor solución posible, 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 gastar para obtenerlo a partir de cereales, en fertilizantes, semillas, cosechas, transporte y tratamiento (véase, por ejemplo, Worldwatch 2007 o CIEMAT 2005). 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 (Zah 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. Todas estas conclusiones se encuentran recogidas en el interesante gráfico de la figura 2, reproducida de Zah 2007, en la que se recogen todos los datos sobre consumo de energía fósil en las labores de cultivo, cose-

cha, pretratamiento y demás procesos necesarios para obtener biocarburantes de diferentes materias vegetales, así como el conjunto de los impactos ambientales, en relación con la utilización directa de los derivados del petróleo.

El tercer reto, por tanto, es perfeccionar la tecnología ya existente en la producción de biocarburantes de segunda generación para llevarla a un nivel de explotación industrial. No se está muy lejos y ya hay algunas plantas piloto en las que se están experimentando varios procesos de fabricación de etanol a partir de este tipo de biomasa que no tiene efectos sobre la alimentación, incurre en menos costes energéticos y tiene menos contraindicaciones ambientales (véase, por ejemplo, Ballesteros 2007 o Signes 2008). Así, el etanol de caña y los biocombustibles de segunda generación podrían disminuir la dependencia del petróleo en el sector del transporte, aunque no podrían suprimirla debido a las limitaciones en tierra cultivable y biomasa disponible en comparación con los gigantescos consumos del sector.

Es más fácil, al menos en principio, sustituir los combustibles fósiles empleados en la generación de electricidad por otras fuentes, renovables o nuclear, que sustituir de forma completa los derivados del petróleo, por lo que, a más largo plazo pienso que se irá hacia vehículos eléctricos, en una primera etapa en la modalidad de híbridos y más adelante sólo eléctricos. El problema aquí es el almacenamiento de electricidad, poco eficiente y muy contaminante, que se realiza en las baterías utilizadas actualmente. Pero hay un intenso trabajo de investigación en nuevos dispositivos de almacenamiento de electricidad

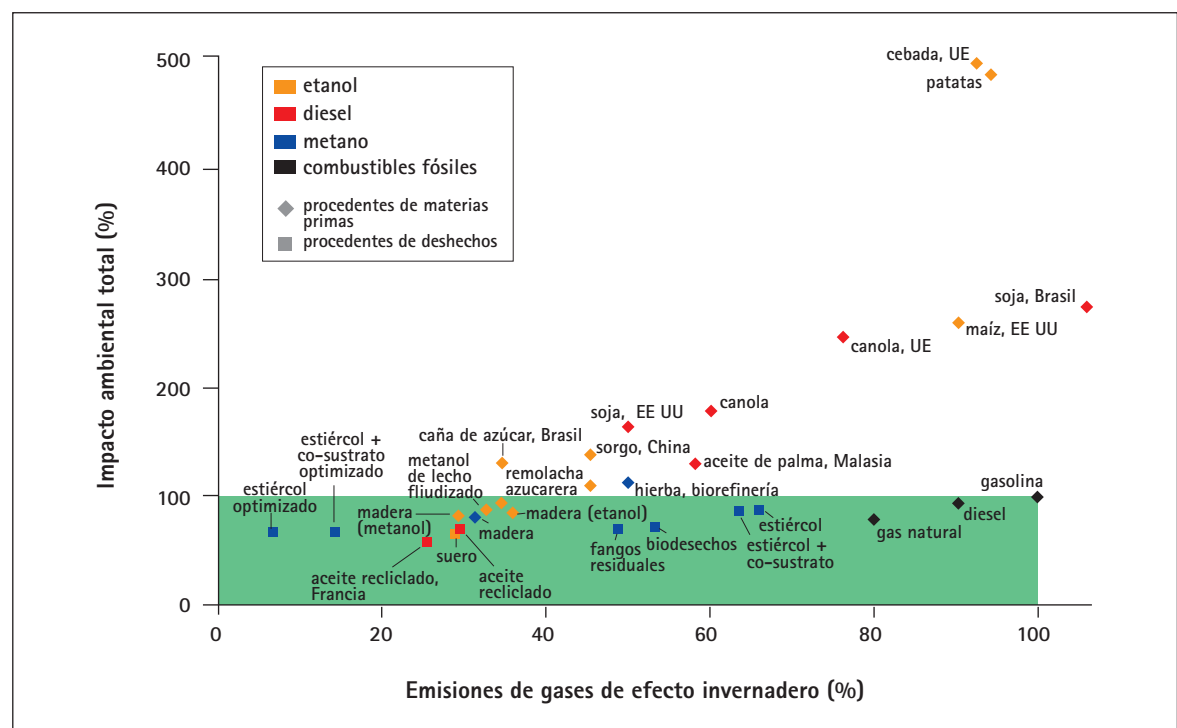


Figura 2. Impacto ambiental y consumo de energía fósil en la producción de biocarburantes relativos a la utilización directa de carburantes derivados del petróleo (Zah 2007).

	Carbón	Gas Natural	Nuclear	Hidráulica	Otras Renovables	Otros
Promedio mundial (06)	40%	20%	16%	16%	2%	6%
EEUU (06)	49%	20%	19%	7%	2%	3%
Francia (06)	4%	4%	78%	11%	1%	2%
China (04)	83%	0%	2%	15%	0%	0%
España (07)	24%	34%	18%	10%	11%	3%

Tabla 1. Generación de electricidad por fuentes de energía primaria, en porcentaje del total.

que permitirán la construcción de automóviles eléctricos con las prestaciones adecuadas.

En general, debe decirse que el problema del almacenamiento de energía, sea en forma de electricidad, calor, hidrógeno o cualquier otra, 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 (véase, por ejemplo, el trabajo de José Luis Mata Vigil-Escalera en Club de la Energía 2008a), un reto formidable si se quieren reproducir las prestaciones del coche de gasolina, el futuro previsible de una parte importante de los vehículos será eléctrico. 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.

¿Carbón limpio?

El esquema de producción de electricidad varía mucho de unos países a otros. En la tabla 1 se dan algunos datos sobre la composición relativa de las fuentes de energía empleadas en la generación eléctrica en España, en algunos otros países y el promedio mundial (IEA Statistics y Club Español de la Energía 2008).

Puede verse que, 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. Nótese, en particular, el caso de China, que, según la Agencia Internacional de la Energía, lleva algunos años poniendo en funcionamiento, en promedio, una nueva gran planta eléctrica de carbón por semana. 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 y aproximadamente un 40% más que la gasolina usada en los motores de explosión, 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 CO₂ 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 CO₂ (CCS, de sus siglas en inglés). Este tipo de procesos se encuentra todavía en una fase muy preliminar. En particular, la captura del CO₂ emitido en la combustión del carbón puede hacerse con técnicas de oxidación, modificando la composición del aire que entra en las calderas de forma que los gases emitidos sean CO₂ prácticamente en su totalidad y no haya necesidad de separarlo, o bien con técnicas de separación tras la combustión con aire. En ambos casos se generarán costes energéticos adicionales y requerirán de nuevos procesos físico-químicos 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 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. De hecho, la mayoría de 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.

Otra experiencia interesante es la de Sleipner, un campo de producción de gas en la costa noruega del Mar del Norte. En este campo, el metano, que es el principal ingrediente del gas natural, sale mezclado con importantes cantidades de CO₂ que, una vez separado en la planta de extracción, vuelve a inyectarse a unos mil metros de profundidad en un lecho de rocas porosas con agua y sales. El secuestro de este CO₂ viene haciéndose desde el año 1996 y los datos

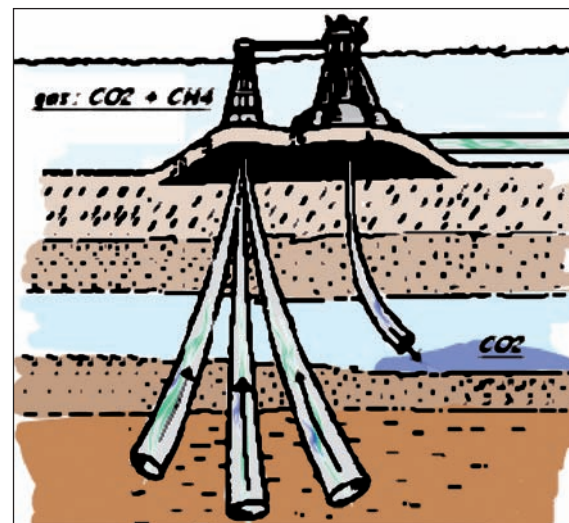


Figura 3. Campo de Sleipner, en la costa noruega del Mar del Norte.

sobre estanqueidad del depósito serán de gran valor a la hora de localizar y utilizar nuevos emplazamientos de forma masiva. En todo caso, hay que remarcar que los procesos de captura y secuestro de dióxido de carbono siempre supondrán un gasto adicional y, por tanto, encarecerán el precio de la energía obtenida a partir de uso limpio del carbón. Los expertos cifran este encarecimiento entre un 30 y un 100% del precio asociado al carbón sin CCS (Socolow 2005, Fundación para Estudios sobre la Energía 2008). De todas formas, este sobrecoste debe ser situado en un contexto de encarecimiento de las energías convencionales y renovables, de costes adicionales por emisiones de CO₂ y de ayudas, del tipo de las contempladas en el Régimen Especial en nuestro país, a las energías no contaminantes. La conclusión es que la humanidad no dejará de utilizar una fuente de energía tan abundante y repartida como el carbón, pero su uso tiene consecuencias ambientales graves por lo que es de la mayor importancia encontrar una forma de contrarrestarlas, por ejemplo con técnicas de CCS.

Electricidad renovable. El viento

Quizá el desafío más importante que tenemos para las próximas décadas es aumentar de forma significativa la contribución de las energías renovables desde el nivel

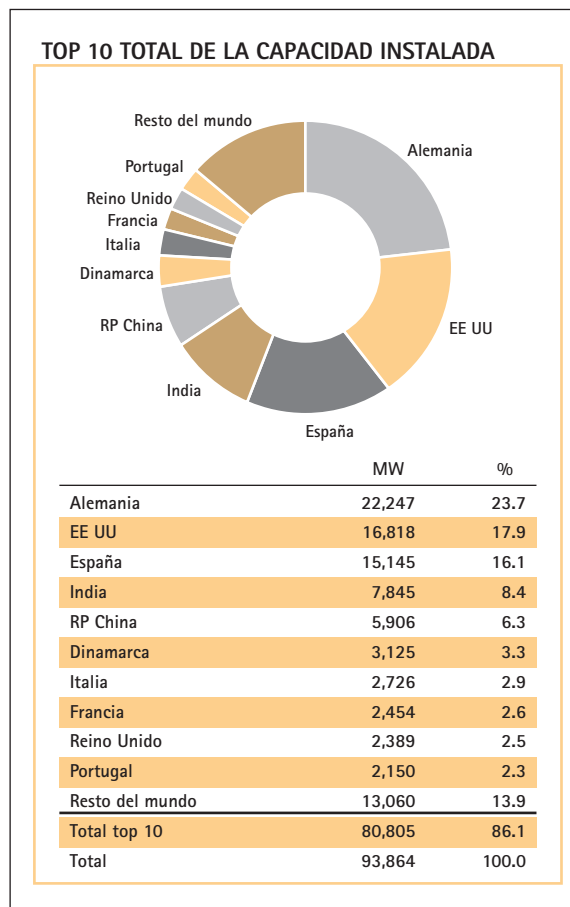


Figura 4. Potencia eólica instalada a 31 de diciembre de 2007.

actual, marginal en términos globales. Las energías renovables distintas de la hidráulica, que es la que tiene una mayor presencia y cuyos recursos han sido utilizados de forma más completa, es decir, esencialmente la eólica y la solar, tienen ventajas e inconvenientes. Las ventajas, que son el negativo de los inconvenientes que enumerábamos al hablar de los combustibles fósiles, 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 coste elevado 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 y sostenible, aunque es verosímil que los costes de las energías convencionales vayan aumentando y convergiendo con las renovables a medida que su disponibilidad disminuya y se imputen los costes de los efectos ambientales. Otra parte del coste elevado de las renovables se debe a que las tecnologías asociadas están todavía en un estadio poco avanzado de desarrollo. En este sentido, para disminuir los costes que derivan de la falta de desarrollo tecnológico es preciso construir un mercado de dimensiones globales. Sólo así se abaratará la producción de componentes, tanto por el aumento de las series producidas como por la aparición de más actores que acaben con el oligopolio existente en algunos de los campos clave, al tiempo que podrán implementarse mejoras en la operación y mantenimiento de las plantas renovables, tras un cierto periodo de experiencia operativa 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.

Como es bien sabido, en España, como en algunos otros países avanzados en este campo, se ha optado por la conformación de un régimen especial de tarifas para las energías renovables (y la cogeneración), excluyendo la gran hidráulica. Se trata de una serie de incentivos, o subsidios, al kilovatio hora de origen renovable con objeto de compensar los mayores costes actuales y estimular así el crecimiento del sector. Las tarifas especiales son distintas para cada tecnología de generación, reflejando los diferentes costes actuales, y tienen vocación de ir disminuyendo en el tiempo según vayan afinándose los costes y convergiendo con los de las energías convencionales. Este o cualquier otro de los esquemas existentes 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 2007, ya existía una potencia eólica acumulada en el mundo de 93.900 MW (Global Wind Energy Council 2008), lo que ha permitido configurar un sector industrial dinámico y en crecimiento en todas las regiones del mundo.

Como se ve en la figura 4, 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 9%. 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€/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, estando situada la tarifa de régimen especial para la electricidad eólica en un sobrepeso del orden de 2,9 c€/kWh (unos 2c\$/kWh en Estados Unidos).

Además del tamaño, se han producido muchas otras mejoras tecnológicas que afectan los elementos móviles, los materiales de que están contruidos, los sistemas de conversión, transformación y evacuación, y los procesos de fabricación y montaje. El reto en este campo consiste en proseguir la extensión del mercado y las mejoras tecnológicas que acabarán por hacer que el coste unitario de la electricidad producida iguale al de la convencional. Y conquistar 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 aero-

generadores cuando la lámina de agua no es muy delgada, así como de evacuación de la electricidad producida.

Tiene, por tanto, la energía eólica un largo recorrido en cuanto a su tecnología y a la extensión territorial a otros ámbitos, el marino desde luego, pero también el de la pequeña eólica, tanto en el entorno urbano como en el de las concentraciones humanas aisladas de la red o con una red débil. 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 ejemplo, los parques eólicos sólo generan energía durante unas dos mil horas al año en promedio, como puede verse en la figura 6, algo menos de la cuarta parte de las que componen un año.

Y no siempre se adecua el momento de la generación con el de los máximos de la demanda. No obstante, durante el mes de marzo de 2008, un mes ventoso, la energía eólica supuso nada menos que el 18,7% de la electricidad generada en España en ese mes y el día 22 hacia las 18h estuvieron activos 9.900 MW eólicos, lo que supuso un 41% de la electricidad global generada en ese momento, y durante todo el fin de semana del 21 al 23 de marzo, la electricidad de origen eólico representó un 28% de la producción total.

Para resolver el problema de la intermitencia es preciso solventar el del almacenamiento que, en el caso de la electricidad de potencia que nos ocupa, puede conseguirse mediante el bombeo de agua en presas de doble vaso, que existen en muy pequeña medida todavía, o bien convirtiendo la electricidad producida en los aerogeneradores en hidrógeno para luego convertir éste de nuevo en electricidad en una pila de combustible cuando se requiera. Justamente, el almacenamiento de energía a partir de fuentes renovables podría ser una de las aplicaciones del hidrógeno como vector energético. Y, desde luego, si se consiguieran nuevos dispositivos de almacenamiento de la electricidad directamente, como la nueva generación de baterías que ya hemos evocado a propósito del transporte, la energía eólica podría contribuir de forma gestionable y todavía más significativa al suministro eléctrico.

Electricidad renovable. El Sol

La radiación solar sobre la superficie terrestre supone, en términos energéticos, del orden de un kW de potencia por metro cuadrado. Promediando sobre todas las horas del año, en un lugar soleado como puede ser el sur de España, equivaldría a la deposición de unos 1.900 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. Lo que, teniendo en cuenta las enormes extensiones de tierra desértica y bien soleada, 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.

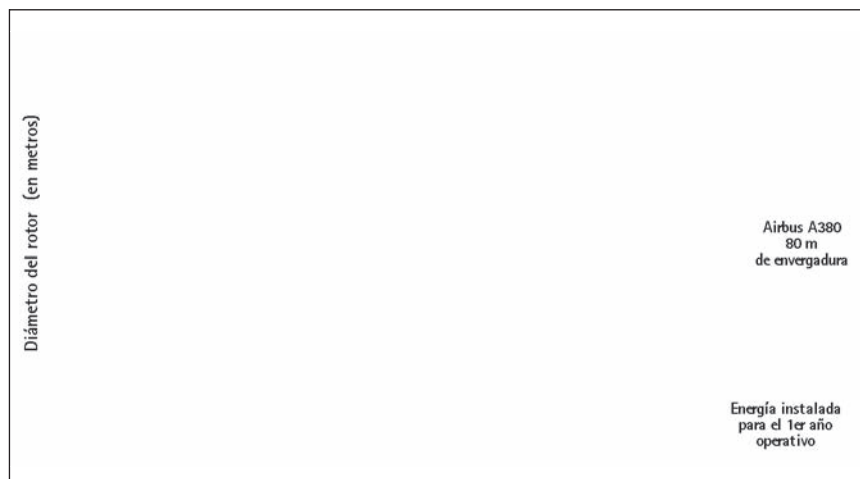


Figura 5. El aumento progresivo de los aerogeneradores. Se detallan potencias en MW y diámetro del rotor (doble de la longitud de las palas) en metros, junto con el primer año en que se puso en operación el primer aerogenerador de cada potencia. Actualmente, existen en Alemania aerogeneradores de hasta 7 MW. Para tener una idea del tamaño de los generadores se comparan con un Airbus 380.

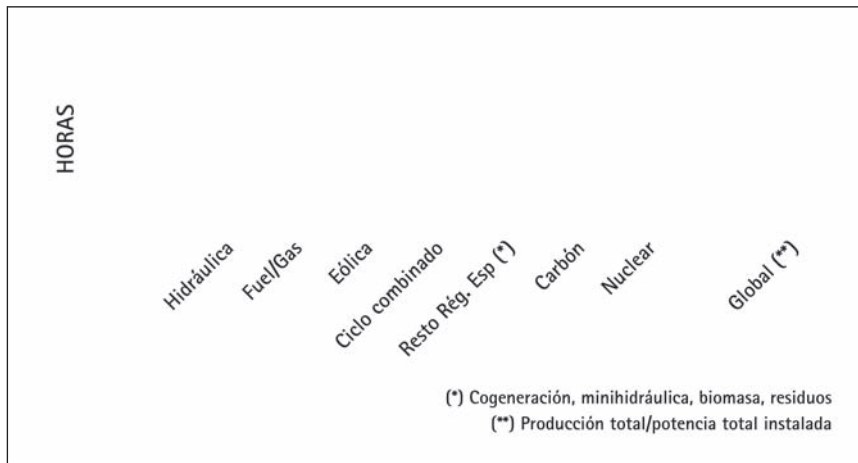


Figura 6. Horas de funcionamiento de las plantas de producción de electricidad por fuente de energía primaria en 2006 (Red Eléctrica Española).

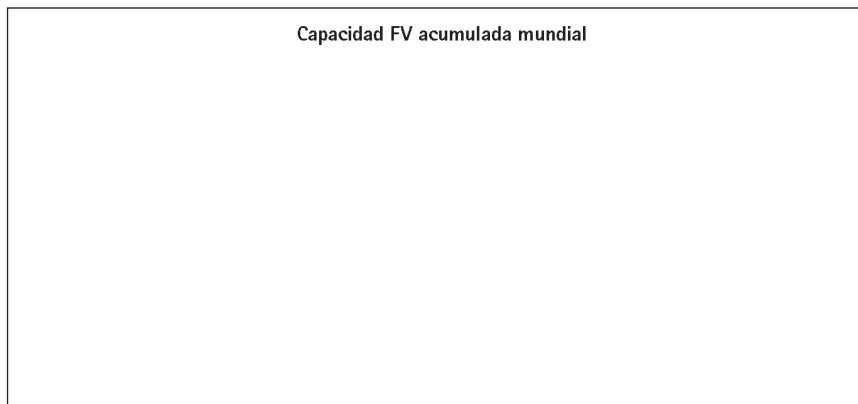


Figura 7. Potencia fotovoltaica instalada en el mundo (EPIA 2008).

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 del resto de las renovables: 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. De hecho, en los sistemas basados en tarifas especiales, la energía fotovoltaica es la que recibe mayor subsidio. Por otra parte, la tecnología fotovoltaica es una de las más versátiles y adaptables a los entornos urbanos debido a su carácter distribuido 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, como se aprecia en la figura 7.

Alemania es el país con mayor potencia instalada, con 3.800 MW, mientras que en España, con 630 MW a finales de 2007, se ha producido un incremento muy considerable de las instalaciones fotovoltaicas a lo largo de los dos últimos años. Dicho incremento, que no sería sostenible en el tiempo, está asociado a la prima de más de 40 c€/kWh prevista en el Régimen Especial, y al anuncio de que la cuantía de dicha prima se revisaría a la baja en septiembre de 2008. Justamente, la fijación de la prima a la energía fotovoltaica es un buen ejemplo de la importancia de determinar los incentivos de forma inteligente. Si son demasiado bajos en comparación con los costes reales y previsibles, entonces no impulsará el desarrollo de esa tecnología desde el momento en que, como ya hemos observado, una condición necesaria es la creación de un mercado extenso. Pero si es demasiado alta, no cumple el propósito de estimular los avances tecnológicos que puedan ir disminuyendo costes y, en consecuencia, la magnitud de las ayudas públicas asociadas a dichos costes.

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 y menos abundantes, 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, se estima que todavía durante muchos 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 debido 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 muy altos en comparación con otras renovables.

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 transformación 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 Estados Unidos. Atendiendo a la forma de los colectores solares y de los receptores, se han diseñado diferentes dispositivos, aunque en lo que sigue vamos a considerar 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 plantas –el complejo SECS– con una potencia total de 350 MW que han venido funcionando hasta la fecha sin ningún tipo de problema, lo



Figura 8. Planta Acciona-Solargenix de 64 MWe situada en Boulder, Nevada.



Figura 9. Aspecto del campo solar de las plantas SECS situadas en Kramer Junction, California.

que implica que disponemos de una valiosa información acerca del funcionamiento de la tecnología en cuestión. 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 ha venido estudiando el conjunto de las tecnologías termoeléctricas, formando personal y ensayando todos los componentes y dispositivos. La existencia de la PSA es uno de los factores que permite explicar el liderazgo de nuestro país en este campo.

La segunda planta comercial en el mundo que utiliza colectores cilindro-parabólicos 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 2.500 MW en los próximos cuatro o cinco años y una cantidad también considerable en Estados Unidos, en general con participación española. Por ejemplo, recientemente se ha adjudicado a Abengoa el llamado proyecto Solana, con dos grandes plantas termosolares por un total de 240 MW ubicadas en Arizona. Las figs. 8 y 9 dan una idea del aspecto de este tipo de plantas y de los espacios requeridos para su instalación.

En nuestro país, entre los numerosos proyectos en curso, está a punto de concluirse Andasol I, la primera planta de 50 MW de un conjunto proyectado por un consorcio en el que participan la empresa Cobra, de ACS, de forma mayoritaria y una empresa alemana, Solar Millenium. La planta de Andasol, situada cerca de Guadix, en Granada, aborda uno de los problemas básicos, ya mencionados, en relación con el uso óptimo de las energías renovables, a saber, el almacenamiento. En este caso, se trata de almacenamiento de calor, que tiene algunas ventajas sobre el de electricidad. En una planta con almacenamiento, una parte del campo solar alimenta, mientras el Sol brilla, el dispositivo de almacenamiento al tiempo que 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 I el almacenamiento tiene capacidad para seguir trabajando a la máxima potencia durante 7,5 horas, lo que hace que la planta sea perfectamente gestionable y 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 (nitratos) 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 la planta Andasol I se utilizarán 28.500 toneladas de nitratos. Existen otras

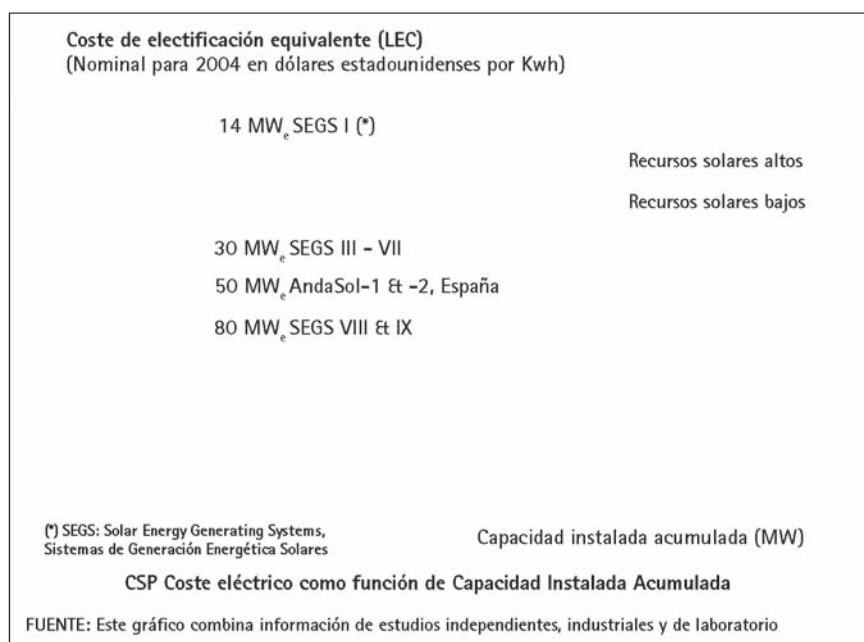


Figura 10. Estimación de la reducción de costes en la electricidad de origen termoeléctrico en función de la capacidad instalada según CSP Global Market Initiative (SolarPaces 2004).

posibilidades de almacenar calor, tales como calor latente en materiales con cambio de fase, en lugar del calor sensible asociado a las diferencias de temperatura, o dispositivos basados en sólidos, 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, siendo la prima establecida en la normativa del Régimen Especial de unos 20 c€/kWh. Y al igual que en el resto de las renovables, es de esperar una reducción de costes a medida que el mercado se expanda. De acuerdo con los estudios de SolarPaces, los costes convergerán con los de las energías convencionales cuando se hayan instalado del orden de 15.000 MW, como puede verse en la figura 10.

Para que esto ocurra son precisos algunos avances tecnológicos, especialmente en la manufactura de los tubos absorbedores, al tiempo que se diversifica el mercado de proveedores, hoy tan estrecho que es difícil que se desarrollen los mecanismos de competencia comercial imprescindibles para la mejora de los procesos de fabricación. Otro de los desarrollos esperados se refiere al fluido caloportador. Como ya se ha dicho, actualmente se utiliza un aceite térmico mineral que tiene el inconveniente de que más allá de una cierta temperatura –del orden de 450°C– se descompone, por lo que no es posible aumentar la temperatura de trabajo y, por tanto, el rendimiento de la conversión de calor en electricidad. Por otra parte, se trata de una sustancia engorrosa de manejar y contaminante. En este sentido, existen programas de investigación avanzados cuyo propósito es la sustitución del aceite por otro fluido, como agua o un gas, que permita aumentar

la temperatura de trabajo y simplifique el diseño de las plantas, abaratando su coste. En estos programas están involucrados grupos de investigación, alemanes y españoles, que trabajan en la PSA, así como las más importantes empresas del sector (véase, por ejemplo, Zarza 2008). En resumen, los retos que plantea la utilización de estas tecnologías se centran en la optimización de tubos, fluido caloportador, sistemas de almacenamiento y colectores, así como en la ampliación del mercado global sobre la base de incentivos públicos.

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 rectangulares concentra la radiación solar sobre el receptor en cuestión, del que se extrae el calor generado mediante algún fluido líquido o gaseoso. Las primeras plantas comerciales en operación han sido construidas en Sanlúcar la Mayor (Sevilla) por Abengoa, las PS-10 y PS-20, de 11 MW y 20 MW de potencia, respectivamente. Por el momento, los costes son superiores a los de la generación basada en colectores cilindro-parabólicos y están en un grado de desarrollo algo más atrasado. Pero presentan algunas ventajas como poder operar a temperaturas mayores y adaptarse a terrenos más accidentados. El proceso de mejora y optimización que se está iniciando es similar al descrito anteriormente, incluyendo los dispositivos de almacenamiento térmico, conceptualmente similares.

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 20% 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, como puede verse en la figura 6. 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 cuenta con una potencia total 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% de los costes totales de construcción y operación. En la figura 11 se compara el coste de la materia prima en las plantas nucleares con las de otras fuentes de energía convencionales.

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 corta duración y de larga duración. Los primeros tienen típicamente una vida media de unos 30 años –la vida media o semiperiodo se define como el tiempo que debe transcurrir para que la actividad de un material disminuya a la mitad–. 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 vida media muy larga, decenas o cientos de miles de años, que se concentran sobre todo en las barras de combustible usado. 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 Almacén 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. Se conoce el principio de dicha transformación, lo que se conoce con el nombre de técnicas de Separación y Transmutación, pero su desarrollo es todavía muy incipiente. Y lo es por su complejidad tecnológica, pero también por la dificultad de experimentar en tecnologías nucleares en un entorno de fuerte oposición pública.

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 funcionamien-

to 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}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 otro 99,3%– e incluso el torio, que es todavía más abundante, en una alternativa explorada de forma prominente en la India. Los reactores de cuarta generación y los dispositivos que incorporan las tecnologías de neutrones rápidos, por ejemplo los Sistemas Asistidos con un Acelerador –ADP, 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 –si utilizáramos todo el uranio y no sólo su isótopo fisible y poco abundante, las reservas se multiplicarían automáticamente por un factor de más de cien.

Los retos indiscutibles 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, lo que puede incidir en una pérdida de conocimientos y capacidades técnicas. En contraste, en muchos otros países del mundo, en particular en Asia, se seguirán construyendo y operando reactores nucleares de segunda y 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, 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_2 .

Pero quizá 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 poten-

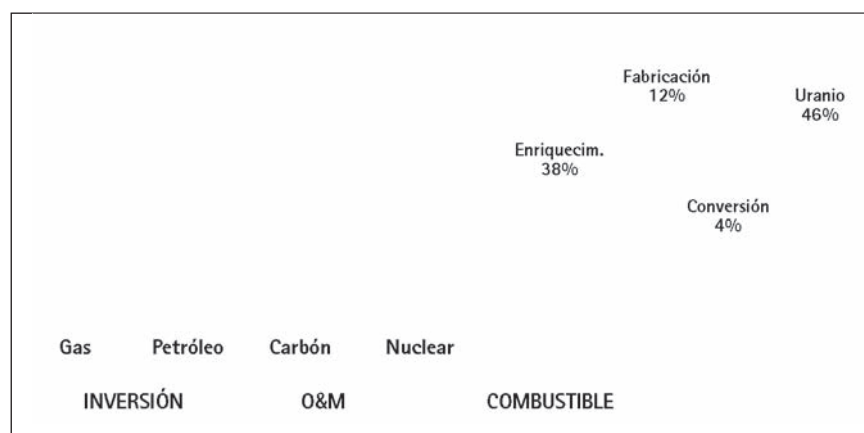


Figura 11. Distribución de costes en distintos tipos de plantas de producción de electricidad.

cialidades 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 el texto del 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 dominio suficiente de este tipo de tecnologías.

Desafortunadamente, la fusión nuclear se incorporará más tarde y no es verosímil que contribuya a aliviar la situación en las próximas décadas. Pero 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 generación IV que permitirán reciclar los residuos y utilizarán el combustible de forma óptima.

No hay soluciones milagrosas que puedan resolver de un plumazo el problema del aprovisionamiento energético de la humanidad. Necesariamente requerirá abordarlo desde todas las perspectivas posibles y actuar desde el punto de vista tecnológico, pero también político y financiero, en todas y cada una de las fuentes disponibles. Sin olvidar el aspecto educativo y de divulgación, tan necesario en una situación en la que la mayoría de la población da por resuelto el problema energético y por descontada la seguridad en el suministro, pero no acepta las servidumbres que inevitablemente conlleva la producción de energía, tanto de tipo económico como de afectación de territorio.

Bibliografía

- Ballesteros, M. «Estado del desarrollo tecnológico de los biocombustibles». *Energía*, vol. 202 (2007): 24-28.
- British Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy* (junio 2008).
- CIEMAT. *Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte*. 2005.
- Club Español de la Energía. *Balance energético de 2007 y perspectivas para 2008*. Madrid, 2008.
- , *Energía: Las tecnologías del futuro*. 2008a.
- European Commission. *The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*. 2007.
- European Photovoltaics Industry Association. *Solar Generation V* (septiembre 2008).
- European Wind Energy Association. *www.ewea.org*. 2008.
- Fundación para Estudios sobre la Energía. *El futuro del carbón en la política energética española*. Madrid, 2008.
- Global Wind Energy Council. *Global Wind 2007 Report*. 2008.
- International Energy Agency. *World Energy Outlook*. 2006.
- , *Key World Energy Statistics*. 2008.
- Signes, V. et al. *Procedimiento para la revalorización energética de la fracción orgánica de residuos orgánicos e instalación*. Solicitud de patente internacional ES2008/000077, 2008.
- Socolow, R. H. «Can we bury global warming?». *Scientific American* (julio 2005): 39-45.
- Solar Paces. *The CSP Global Market Initiative*. 2004.
- United Nations. *Human Development Report*. 2006.
- World Nuclear Association. *www.world-nuclear.org*. (septiembre 2008).
- Worldwatch Institute. *Biofuels for transport*. Earthscan, 2007.
- Zah, R. et al. *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. Switzerland: Empa, St. Gallen, 2007.
- Zarza, E. et al. *Almería GDV: The first solar power plant with direct steam generation*, 2008.