

# Seguridad y energía

El riesgo de las fuentes energéticas



# El riesgo de las fuentes energéticas

Julián Barquín Gil, Pedro Linares Llamas, Julio Montes Ponce de León, José Ignacio Pérez Arriaga

Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas

El riesgo es una consecuencia de nuestra ignorancia. Planificamos un curso de acción, pero no sabemos si las condiciones del futuro permitirán llevarlo a cabo, ni podemos predecir todas las consecuencias de nuestras acciones. No obstante, no podemos no actuar. Así que intentamos acotar el riesgo, medirlo incluso aún a sabiendas de la, en muchos casos, casi patética naturaleza de nuestros esfuerzos.

No podemos no actuar. La demanda mundial de energía está creciendo, y lo seguirá haciendo mientras crezca la población y, quizá incluso más importante, mientras la mayoría de la humanidad que vive en la pobreza siga intentando alcanzar el nivel de vida de sus prójimos más afortunados. Los recursos naturales que tradicionalmente nos han proporcionado energía, y muy en especial el petróleo, no podrán sostener este consumo creciente durante tiempo indefinido, lejos de ello es muy probable que el lector vea como la era del petróleo llega a pasar. Y el medio ambiente se podría ver gravemente afectado si no se extienden nuevas tecnologías energéticas y patrones de consumo.

No sabemos qué va a ocurrir. Como especie, no sabemos la cantidad total de recursos de los que podremos disponer, como nación no sabemos lo fácil o difícilmente que podremos acceder a ellos. No sabemos lo rápida o lentamente que se darán los avances tecnológicos que tanto deseamos, y mucho menos qué coste tendrán. No comprendemos bien algunas de las consecuencias, y en especial las consecuencias a largo plazo, de las formas

actuales de producción de energía. Y, finalmente, todavía menos podemos anticipar nuestras reacciones, o las de nuestros posibles descendientes, a las situaciones que el futuro nos depare.

No obstante, debemos prever. O intentarlo al menos. Con la seguridad de que lo imprevisto surgirá, pero sabiendo que solamente si se actúa con prudencia se podrán evitar los peores resultados. Y la dificultad de que todo está ligado: no es posible discutir un problema en completa abstracción de los demás. A pesar de ello, necesitamos poner un cierto orden. Aquí el orden escogido ha sido el de las opciones tecnológicas, pero otros son posibles y quizá más adecuados (por ejemplo, por el tipo de riesgo afrontado).

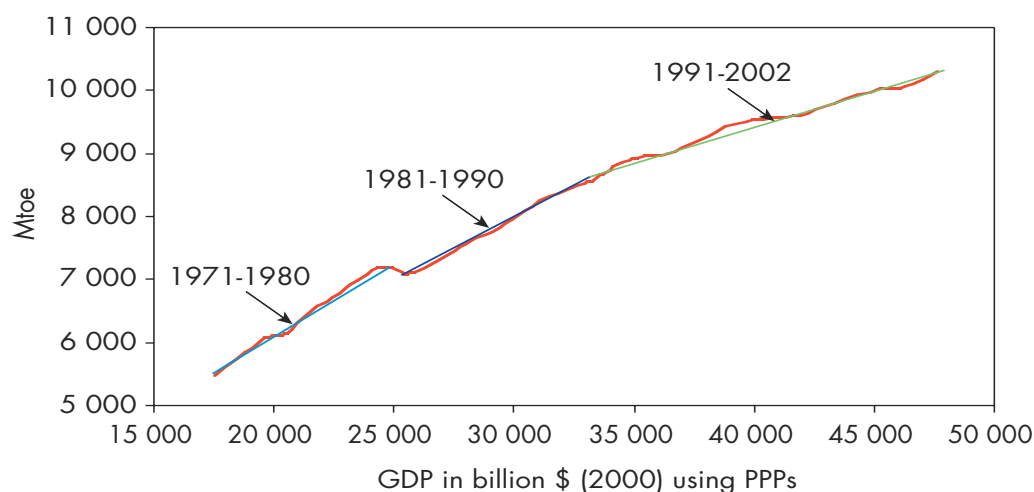
Finalmente, no hay soluciones perfectas, ni únicas. Debemos resignarnos a buscar la menos mala, o de forma más precisa la combinación menos indeseable, a reconocer que vivimos en un mundo imperfecto, qué cualquier solución ha de ser juzgada por comparación a las demás. Aunque el objetivo de estas notas no es tan ambicioso: nos sentiremos felices si hemos puesto de manifiesto los principales problemas que podemos apreciar.

## 1. La necesidad de actuar

Existe una relación indudable entre la actividad económica y el consumo de energía. La figura 1.1 muestra cómo se han relacionado estas dos magnitudes en el pasado reciente. Junto a los datos originales (en rojo), se han dibuja-

La demanda mundial de energía está creciendo y los recursos naturales que tradicionalmente nos han proporcionado energía no podrán sostener este consumo creciente durante tiempo indefinido

Figura 1. Relación entre el consumo de energía y el PIB globales



Fuente: *World International Outlook*, International Energy Agency, 2004. Disponible en [www.iea.org](http://www.iea.org)

do tres rectas (en azul claro, oscuro y verde) que aproximan la curva original en los 70, los 80 y los 90 respectivamente,

La figura 1 sugiere varios mensajes. El primero es que el consumo de energía crecerá según el mundo vaya siendo más rico. El segundo es que es posible que el ritmo de crecimiento se modere, pues así lo ha hecho recientemente. En efecto, en los años 70 un incremento del 1% en el PIB implicaba un crecimiento del 0.7% en la demanda de energía, frente a tan solo un 0.4% en los años 2000. Parte de este cambio se ha debido a una economía energéticamente más eficiente, pero parte también a la existencia de inviernos particularmente cálidos en el hemisferio norte, a su vez una posible consecuencia del cambio climático global.

Si extrapolamos las tendencias actuales, nos encontramos con incrementos muy marcados del consumo energético a largo plazo. Por ejemplo, si durante los próximos 30 años el PIB mundial creciera a un ritmo medio del 3.5% anual (cifra, por otra parte, del orden de la habitualmente supuesta), cabría esperar (con la eficacia energética actual) un incremento del 1.4% anual, lo que se traduce en un incremento del 52% en 30 años. Claramente, la cifra

final dependerá tanto del crecimiento de la economía como de las mejoras en su eficacia, pero no parece realista considerar incrementos muy inferiores a los señalados. Sin embargo no debe ignorarse el aparente interés que, al menos en la Unión Europea y otros países industrializados, están adquiriendo las propuestas sobre medidas de ahorro y eficiencia energética, supuestamente con un gran potencial de reducción del consumo energético y que, por tanto, debieran considerarse equivalentes a una nueva tecnología de producción.

Si no existen cambios en la cartera de tecnologías energéticas ahora empleadas, este incremento de la demanda implicará cuando menos incremento en los precios de los combustibles fósiles, y en especial de precio del petróleo. Serán también de temer problemas de abastecimiento. Estas cuestiones han sido tratadas ya en otro de los informes presentados a este foro, por lo que no insistiremos en ellas, salvo para indicar que podrían caer con toda justicia dentro del campo de la seguridad nacional.

Pero es que el incremento de consumo de combustibles fósiles, con las tecnologías actuales, también nos podría conducir a serios problemas ambienta-

Si no existen cambios, el incremento de demanda implicará un incremento de los precios de los combustibles fósiles

les. Sin duda se plantearán problemas de carácter "local", tales como los derivados de las emisiones de dióxido de azufre u óxidos de nitrógeno, especialmente en economías en rápido desarrollo, como China. En el momento presente, la responsabilidad y la autoridad sobre dichos problemas recae de forma casi exclusiva sobre las entidades nacionales directamente afectadas<sup>1</sup>. No obstante, cabe prever un cambio general de actitud que podría involucrar a autoridades globales, como está ya empezando a suceder en el campo de los derechos humanos.

Estos problemas locales admiten en general una solución relativamente sencilla en comparación con el problema del cambio global. La figura 2 muestra predicciones de cambio climático en función de diversos escenarios de desarrollo económico, social y tecnológico.

El escenario A1F1 representa un futuro de rápido desarrollo económico y tecnológico, aunque con una dependencia elevada de combustibles fósiles. El incremento de temperatura esperado en el 2100 es de más de cuatro grados, más del doble del obtenido en un escenario como el B1, también caracterizado por un rápido crecimiento aunque con un gran énfasis en el desarrollo

limpio. El coste del cambio climático es muy incierto, pero ciertamente no es simplemente proporcional al incremento de temperatura, sino que podría crecer más rápido que ésta. Para incrementos superiores a 4 ó 5 grados existe incluso el riesgo de discontinuidades de gran escala (por ejemplo una paralización de la circulación termohalina responsable del clima anómalamente benigno de Europa occidental).

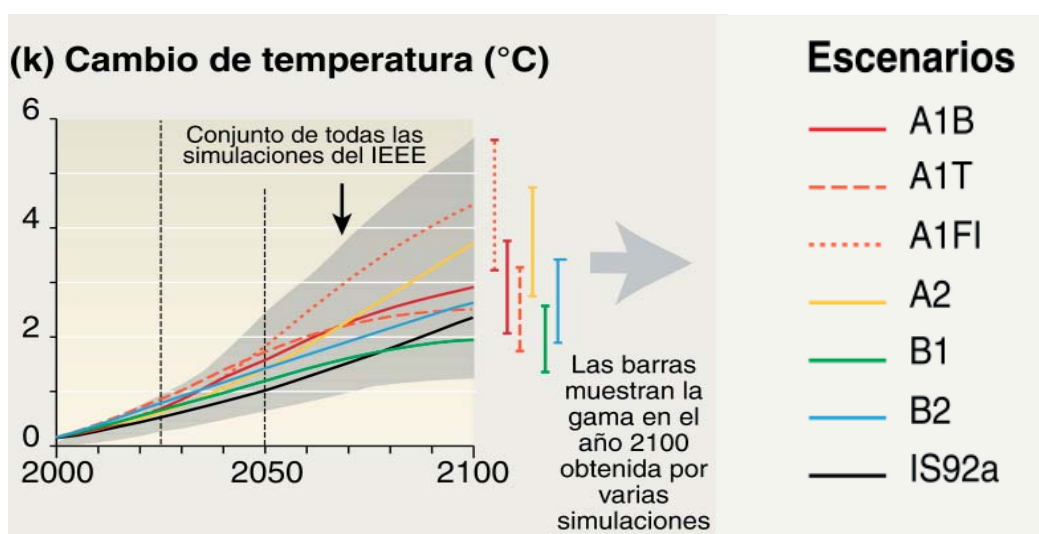
Las propias simulaciones muestran una gran incertidumbre, tal como se aprecia en la propia figura 2. La incertidumbre real es incluso mayor, al existir dudas sobre si el modelado de las dinámicas implicadas es lo suficientemente exhaustivo y preciso. Esto significa que existe la posibilidad de que los efectos del cambio climático sean menores que los previstos, y que por consiguiente la continuación de las tendencias presentes pudiera no conllevar grandes costes. Pero la posibilidad contraria también existe, lo que podría justificar acciones más decididas y tempranas.

Existen, en primera aproximación, varias grandes líneas de actuación no necesariamente excluyentes para evitar estos riesgos: un uso más decidido de medidas de mejora de la eficiencia y del ahorro energético, el incremento de los sumideros biológicos, la reduc-

El incremento de consumo de combustibles fósiles nos podrá conducir a serios problemas ambientales

Se han hecho diferentes predicciones de cambio climático en función de diferentes escenarios de desarrollo económico, social y tecnológico. Los resultados presentan grandes incertidumbres ya que existe tanto la posibilidad que los efectos del cambio climático sean menores como que se cumplan

Figura 2. Predicciones de cambio climático



Fuente: *Cambio Climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para Responsables de Políticas*. Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2001. Disponible en <http://www.ipcc.ch/>

<sup>1</sup> Siendo la Unión Europea, con amplia jurisdicción sobre estos problemas, una excepción relevante.

ción en las emisiones de gas de efecto invernadero distintos del CO<sub>2</sub>, el uso de tecnologías de captura de dióxido de carbono, el de la energía nuclear, y el de las energías renovables. Casi todo el mundo está de acuerdo en lo referente a la conveniencia en el uso de las tres primeras posibilidades, aunque existen controversias en lo relativo al potencial existente y en cuanto a los instrumentos más adecuados. En cuanto a las tres últimas (captura del CO<sub>2</sub>, energía nuclear y renovables) están en cualquier caso lejos de ser bendiciones puras, sino que todas ellas presentan sus propias incertidumbres y sus propios problemas de seguridad.

Finalmente, debiera tenerse presente que una parte importante del consumo energético global está relacionado con el transporte, para el que no existen alternativas en el corto plazo al uso de derivados del petróleo (exceptuando ferrocarriles de tracción eléctrica). Por tanto, es imperativo el desarrollo de sistemas de transporte alternativos, quizá basados en el uso de vectores energéticos que permitan el uso como fuentes de energía primaria de energía nuclear, renovable o fósil en instalaciones fijas dotadas de sistemas de captura de carbono. Hidrocarburos sintéticos, biocarburantes, hidrógeno o electricidad (para coches eléctricos) son posibles alternativas.

En cualquier caso, la inmensa mayor parte del crecimiento futuro de la demanda energética provendrá de los actuales países en vías de desarrollo, por lo que son absolutamente críticas las elecciones que ellos realicen en esta materia. En este sentido, el mayor efecto de las decisiones tomadas en el mundo desarrollado puede ser el relativo a las tecnologías que aquí se impulsen, que serán en medida importante las que todos usaremos.

Esto no implica que las inversiones que se hagan en el mundo desarrollado sean despreciables. De hecho, la Agencia Internacional de la Energía estima que en los países desarrollados (es decir, la OCDE) durante los próxi-

mos veinte años habrá que invertir lo necesario para esencialmente duplicar los sistemas eléctricos existentes, debido al crecimiento de la demanda y a la obsolescencia de las infraestructuras actualmente existentes.

## 2. Captura y almacenamiento del carbono

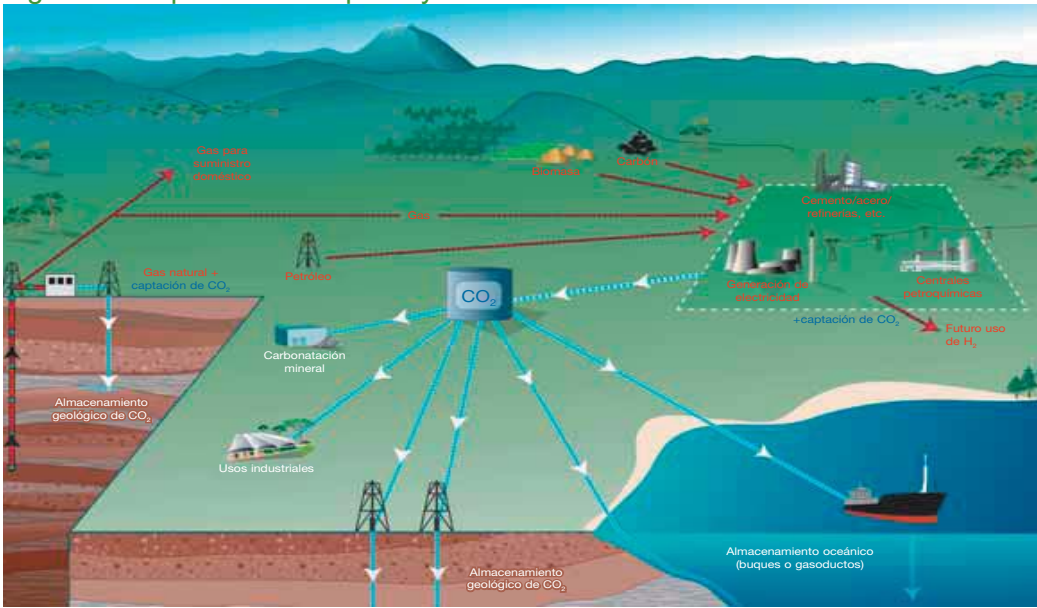
Esta opción se suele discutir dentro del contexto de un uso mayor del carbón, aunque también podría emplearse con otras tecnologías basadas en combustibles fósiles, como el gas natural. En cualquier caso, siendo las reservas de carbón mucho mayores y más ampliamente distribuidas que las de hidrocarburos, y en especial que las del petróleo “convencional”, la implantación de estas tecnologías no solamente aliviaría los problemas derivados del cambio climático, sino también aquellos relacionados con la seguridad del suministro. Téngase en cuenta que las enormes inversiones ya realizadas para la explotación de combustibles fósiles son, de hecho, un obstáculo importante para cualquier política que pretenda limitar significativamente su uso continuado. Esto es particularmente cierto para dos países: los Estados Unidos, que son el mayor consumidor de energía y cuyo modo de vida se basa en un uso particularmente intensivo de combustibles; y China, que es la economía nacional que está creciendo a un mayor ritmo y que no oculta su intención de explotar sus grandes recursos carboníferos.

La figura 3 muestra un esquema de las tecnologías implicadas. En principio, cabe distinguir tres fases: la captura, el transporte y el almacenamiento del dióxido de carbono.

- **Captura.** Las tecnologías implicadas no son nuevas. La eliminación de CO<sub>2</sub> de gas natural impuro, así como en menor escala su extracción de otros procesos industriales para su uso en las industrias químicas y alimenticias, son prácticas que ya tienen una larga historia. Adicionalmente, se han desarrollado una variedad de métodos para

Una parte importante del consumo energético global está relacionado con el transporte. Por tanto, es imperativo el desarrollo de sistemas de transporte alternativos

Figura 3. Esquemas de captura y almacenamiento del carbono



Fuente: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Disponible en <http://www.ipcc.ch/>

extraer CO<sub>2</sub> en procesos de producción de hidrógeno, paso necesario en el refinado del petróleo, la producción de amoníaco y otras industrias. Es preciso señalar que estas técnicas están especialmente adaptadas a grandes instalaciones industriales. No parece que vaya a ser factible la extracción de fuentes pequeñas y dispersas, como automóviles. Por otra parte, si estas fuentes utilizaran hidrógeno como combustible, sería posible proceder a la captura del carbono en la instalación de síntesis de hidrógeno, aún cuando la fuente primaria de energía fuera fósil<sup>2</sup>.

· **Transporte.** Típicamente, la producción de CO<sub>2</sub> y los sitios de almacenamiento se encontrarán a distancias significativas. La alternativa más prometedora para el transporte de CO<sub>2</sub> es mediante gasoductos. Como ocurre con el caso del gas natural, cabe esperar que el coste del transporte esté dominado por el coste de inversión en la infraestructura necesaria. Por otra parte, las tecnologías necesarias están en general muy bien desarrolladas, siendo también posible tener estimaciones razonables de costes.

· **Almacenamiento.** Éste es el aspecto donde hay una menor experiencia. Existen, no obstante, varias posibilidades:

Uso directo. Como se mencionó anteriormente, el CO<sub>2</sub> tiene actualmente alguna utilidad industrial, y existen posibilidades limitadas de usos adicionales. No obstante, parece que en cualquier caso estas posibilidades son muy limitadas.

Almacenamiento geológico. Podría ser almacenado en yacimientos agotados de gas y petróleo, en acuíferos o en yacimientos metaníferos de carbón. Algunas de estas técnicas están bien probadas como, por ejemplo, la inyección de CO<sub>2</sub> en yacimientos de petróleo en declive. En sus fases iniciales está la inyección en yacimientos metaníferos de carbón, con la finalidad de desplazar el metano adsorbido en el carbón para su extracción posterior. En estos casos, el almacenamiento del CO<sub>2</sub> tiene un uso, por lo que es muy atractivo desde el punto de vista del coste. Por otro lado, este tipo de oportunidades podrían ser limitadas: en los Estados Unidos una estimación muy optimista sería una capacidad de al-

2

De hecho, actualmente la práctica totalidad del hidrógeno se sintetiza a partir de gas natural.

macenamiento igual a 15-20 años a los ritmos de emisión actuales, siendo cifras más realistas muy significativamente inferiores<sup>3</sup>. La capacidad de almacenamiento en acuíferos es mucho mayor, aunque puede existir en ocasiones el riesgo de fugas hacia el suministro de agua potable<sup>4</sup>. Por otra parte, en circunstancias ideales, reacciones químicas entre las rocas y el CO<sub>2</sub> podrían convertir éste en carbonatos, extremadamente estables.

Almacenamiento oceánico. En principio, la capacidad de almacenamiento de los océanos es inmensa, y de hecho alrededor del 90% de las emisiones actuales de CO<sub>2</sub> acabarían finalmente disueltas, aunque el proceso natural durará milenios. Si se inyecta en capas superficiales el gas volvería a la atmósfera en un tiempo relativamente corto. Existen dos procedimientos principales en los que el CO<sub>2</sub> permanecería en el océano: inyección a profundidades de 1000-1500 metros mediante un gasoducto, de forma que el CO<sub>2</sub> se disuelva en el agua circundante; o inyección en el océano profundo (más de 3000 metros de profundidad), de forma que se forman depósitos en el fondo marino<sup>5</sup>. En cualquier caso, hay que tener presente que la disolución de CO<sub>2</sub> en el agua marina incrementa su acidez. Esto podría tener consecuencias graves para la biota afectada en las proximidades del punto de inyección.

Conversión en carbonatos. En el muy largo plazo (millones de años) el CO<sub>2</sub> emitido se transformará en carbonatos, minerales donde quedará capturado durante eras geológicas. Este proceso puede realizarse a escala industrial en unos pocos minutos. Sin embargo, requiere de grandes cantidades de yeso, roca calcárea o algún otro mineral rico en calcio o magnesio. Por tanto, hay que prever los posibles impactos medioambientales. Por ejemplo, se estima que en el caso de los Estados Unidos, la

operación de minería requerida sería del orden de magnitud de todas las actualmente existentes<sup>6</sup>.

Conversión en biocombustible. Existe la posibilidad de bombear el CO<sub>2</sub> en estanques con altas concentraciones de algas u otros organismos fotosintéticos, que en presencia de luz solar y agua lo transformarían en material orgánico que sería la base para la síntesis de biocombustibles<sup>7</sup>. Sin embargo, limitaciones en la luz solar y el agua disponibles podrían causar que esta tecnología solamente pudiera desplazar una cantidad relativamente pequeña del CO<sub>2</sub> producido.

Una manera de analizar la factibilidad económica de estas alternativas es mediante el cálculo del coste adicional del carbono emitido que las haría factibles (como es, por ejemplo, el precio de los permisos de emisión). Aunque es cierto que en algunas aplicaciones nicho son ya rentables, la extensión en gran escala en generación eléctrica requeriría precios del orden de 200-300 dólares por tonelada de carbón<sup>8</sup>. Mientras estos precios son claramente muy superiores a los precios actuales, del orden de 50 dólares por tonelada, no parecen absurdamente altos si una implementación más estricta del protocolo de Kyoto o su sucesor fuera a tener lugar en el futuro.

Como se ha comentado anteriormente, el desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, al eliminar una parte importante de las emisiones del CO<sub>2</sub>, minimiza el cambio climático. En la medida que se complemente con la explotación de los abundantes y bien distribuidos recursos carboníferos mejorará la seguridad del suministro, en especial con respecto a una mayor dependencia del petróleo y el gas natural. Por otra parte, existen riesgos ambientales ligados al almacenamiento cuya gravedad, actualmente, no es bien conocida. Por otra parte, es preciso tener en cuenta que es una solución transitoria: en el largo plazo las reser-

3

*Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies*, Soren Anderson y Richard Newell, 2003

4

*El muy publicitado proyecto de inyección de la compañía petrolífera noruega Statoil es de este tipo: inyección en un acuífero, aunque submarino. Ver [www.statoil.com/co2](http://www.statoil.com/co2)*

5

*Específicamente, en forma de clatratos (es decir, como dióxido de carbono disuelto en hielo), que se desplazan de forman poco clara.*

6

*Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies*, Soren Anderson y Richard Newell, 2003

7

Para un proyecto reciente, véase <http://web.mit.edu/newsoffice/2004/algae.html>

8

*Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies*, Soren Anderson y Richard Newell, 2003. La cifra es un tanto incierta, tanto por las incertidumbres existentes en el desarrollo futuro de las tecnologías implicadas como por las existentes en el precio de los combustibles fósiles y fuentes alternativas de energía.



vas de combustibles fósiles son finitas, así como la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>. No obstante, pueden aportar un muy valioso tiempo extra de transición a una economía descarbonizada

### 3. Energía nuclear

Hay pocos temas que levanten pasiones más encendidas que éste. No obstante las sociedades, al igual que las personas, deben intentar valorar de la forma más objetiva posible las ventajas e inconvenientes de los diferentes cursos de acción que se les presentan.

En este sentido, hay muchos argumentos válidos a favor de un mayor desarrollo de esta fuente de energía. No lleva asociadas emisiones de dióxido de carbono<sup>9</sup>, tiende a aliviar los problemas de seguridad del suministro<sup>10</sup> y tiene un coste que es comparable<sup>11</sup> al de otras fuentes en explotación comercial, como el carbón, y podría ser más bajo en el futuro, bajo condiciones regulatorias favorables.

Por otra parte, la práctica totalidad de los argumentos en contra se basan en argumentos relativos a seguridad. Básicamente, se pueden clasificar en tres aspectos: los relativos a la seguridad de la operación, aquellos que tienen que ver con la seguridad de almacenamiento de los residuos, y finalmente todo lo relacionado con la proliferación del armamento nuclear.

La seguridad del suministro de material nuclear no ha sido objeto de una atención tan intensa como la otorgada a los recursos fósiles. Sin embargo, se ha argumentado que podría haber problemas de suministro de uranio a precios razonables en caso de una expansión masiva del sector nuclear. Las reservas conocidas de Uranio-235 son suficientes para alimentar durante al menos 50 años un parque como el actual. Se tiene certeza de la existencia de otras reservas que no están cuantificadas,

cuya explotación se detuvo al cesar la construcción de nuevas centrales. No obstante las cantidades de Uranio-238 susceptibles de convertirse en Plutonio son muy grandes. De hecho, los reactores franceses ya están consumiendo combustibles mixtos de Uranio-Plutonio, aunque se ha abandonado la construcción de nuevos reactores rápidos reproductores. La reelaboración de los elementos combustibles puede proporcionar cantidades adicionales de material fisible. Por otra parte existe la posibilidad de convertir el Torio-232 en un nuevo material fisible Uranio-233. El proceso se puede realizar en los "amplificadores de energía" cuyos prototipos se están desarrollando a escala mundial, pero especialmente en el CERN<sup>12</sup>.

Por tanto, como vemos, no parece haber problemas de suministro si se mantiene la situación actual. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las necesidades de uranio si se adopta la energía nuclear como respuesta al cambio climático (y por tanto se incrementa enormemente la potencia nuclear instalada) serían enormes, y por tanto todas las cifras mencionadas deben manejarse con mucha precaución.

Por otra parte, ha de tenerse en cuenta que el sistema actual de generación de electricidad mediante energía nuclear se basa en el enriquecimiento del uranio en unas pocas instalaciones para su uso posterior en centrales de generación. La razones principales que parecen justificar este esquema es el enorme consumo energético que necesita el proceso y el control de la proliferación de armamento nuclear. Para los países con un parque nuclear limitado la opción económicamente más favorable es el suministro de combustible nuclear de plantas de enriquecimiento situadas en países extranjeros, lo que podría ser percibido como una amenaza a su seguridad de suministro, tal como de hecho esta actualmente sucediendo en Irán<sup>13</sup>.

Podría haber problemas de suministro de uranio a precios razonables en caso de una expansión masiva del sector nuclear

#### 9

Si se considera el ciclo completo, existen emisiones asociadas a tanto operaciones de minería del uranio como a la propia construcción de las centrales que son, en cualquier caso, mucho menores que con otras alternativas, y en especial las basadas en combustibles fósiles.

#### 10

Los yacimientos de uranio están razonablemente bien extendidos y en todo caso en países diferentes a los que poseen los yacimientos de petróleo y gas natural. De todas formas, en muchos casos, el problema podría estar en el suministro de uranio enriquecido. En el caso de España se ha importado uranio enriquecido de nuestros socios de la Unión Europea, de Rusia así como de los Estados Unidos.

#### 11

*Suponiendo que se internalizan los costes moderados y razonables, pero muy discutidos, de desmantelamiento de las plantas y almacenamiento de los residuos.*

#### 12

El Centro Europeo para la Investigación Nuclear, al que pertenecen la mayor parte de los países europeos, incluida España

#### 13

Irán compró dos reactores en los años 80 de tecnología alemana que ni puede poner en funcionamiento, a pesar de estar construidos, por falta de combustible, debido al embargo al que está sometido. Este hecho justificaría el presente programa de construcción de instalaciones de enriquecimiento (al parecer, muy popular en el propio Irán); a pesar de las presiones internacionales argumentadas con razones relativas a la proliferación de armamento nuclear.

La posibilidad de un accidente nuclear grave es algo que está siempre muy presente

### 3.1. Seguridad de la operación nuclear

La posibilidad de un accidente nuclear grave es algo que está siempre presente. No es un temor irracional, ya que los ha habido, y de forma muy notable el accidente de Chernobil. Éste fue la realización de uno de los peores escenarios imaginables. Antes de entrar en una descripción más detallada, es preciso recordar que el siguiente peor accidente (el de la isla de las Tres Milas), aunque conllevó la paralización de la operación del reactor, no produjo daños graves ni a la integridad del edificio de contención, ni a las personas ni al medio ambiente. En cuanto a los demás, se puede decir que los daños al medio han sido mínimos, así como al personal no asociado a la industria<sup>14</sup>.

En Chernobil se produjo la rotura del reactor y la salida del material radioactivo al exterior, dispersándose por una gran parte de Europa Oriental y Occidental. Como consecuencia se evacuaron los 30 kilómetros alrededor de la central (unas 100.000 personas)<sup>15</sup>. El número de muertes es difícil de evaluar. Las únicas indiscutibles son unas 200 que estaban en la planta en el momento del accidente o que acudieron posteriormente al mismo (principalmente, bomberos y militares).

No obstante, existe evidencia que la nube de material radioactivo que cayó sobre Europa tuvo unos efectos mucho mayores. Una cifra citada a menudo es la de 17.400 muertos<sup>16</sup>. Es importante tener en cuenta que esto no es más que una estimación estadística<sup>17</sup>. El modelo subyacente es, grosso modo, que cada átomo radioactivo absorbido por el cuerpo humano aporta la misma probabilidad de que éste desarrolle un cáncer. Sin embargo publicaciones recientes de organismos tan autorizados como la Agencia de Energía Atómica o la Organización Mundial de la Salud, consideran que esta cifra es excesiva, ya que existe evidencia, que para dosis muy bajas el riesgo de desarrollo de un

cáncer es nulo, lo que llevaría a una cifra de muertos también mucho menor. Estos estudios, basados en un modelo más sofisticado que el anterior, arrojan una cifra global de unos 4.000 muertos<sup>18</sup>. Los estudios epidemiológicos, que en teoría podrían aportar luz sobre esta cuestión, son cuestionables debido a la poca fiabilidad de las estadísticas existentes en las zonas más afectadas (principalmente Bielorrusia y Ucrania), como al interés de los gobiernos pasados y actuales en obtener réditos de distinto tipo de este accidente. No obstante incluso 17.400 muertos no es más que un incremento del 0,01% del número de cánceres “naturales” en la región afectada, lo que hace difícil una evaluación precisa de este efecto.

Se ha argumentado que el accidente de Chernobil se debió tanto a un diseño inadecuado de la central (por ejemplo, carencia de cúpula de contención) como a una operación impropia (la central se encontraba realizando unas pruebas en condiciones peligrosas debido a presiones políticas), y que tales factores no se pueden dar en centrales “occidentales”. Si esto es cierto, también lo es que es imposible reducir la probabilidad de un accidente industrial a cero. En 1975, Rasmussen<sup>19</sup> estimó que la probabilidad de accidente catastrófico<sup>20</sup> de un reactor de agua a presión (el tipo más común hoy en día) era del 0.005% por año. En España, con 8 reactores, tendríamos una probabilidad total del 0.04% por año, aunque se puede argumentar que la seguridad ha aumentado desde la época del informe, conforme se ha ido adquiriendo más experiencia y se han endurecido los criterios de seguridad, especialmente después de Chernobil. Por otra parte, las hipótesis hechas por Rasmussen eran y son cuestionables, por lo que también se puede argumentar en sentido opuesto.

14

Mención aparte merecerían los problemas ambientales causados por actividades nucleares militares, tanto en lo relativo a las pruebas nucleares como a las operaciones relacionadas con la fabricación de armamento. No se tratarán aquí estos temas.

15

La evacuación solo se inició varios días después de ocurrido el accidente, porque las autoridades soviéticas lo ocultaron inicialmente. Solamente cuando desde Suecia se dio la voz de alarma, como consecuencia de las medidas de radioactividad allí tomadas, se empezó a informar de lo ocurrido.

16

Lynn R. Anspaugh, Robert J. Catlin y Marvin Goldman. The global impact of the Chernobyl accident. Science, 242:1513-1519. 1988.

17

Es decir, aunque es posible estimar una cifra global de afectados, es en general imposible atribuir ningún fallecimiento específico al accidente.

18

Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes. World Health Organization, 2006.

19

E. Rasmussen, The Safety of Nuclear Power Reactors and Related Facilities, Atomic Energy Commission, 1975

20

La fusión del núcleo. Esto no implica necesariamente la liberación de material radioactivo al ambiente.

### 3.2. Gestión de los residuos

El problema del tratamiento de los residuos nucleares es uno de los más graves que presenta el uso de la energía nuclear. Una central nuclear de 1000 MW produce, a lo largo de un año, unos 15.000 metros cúbicos de residuos de baja actividad, unos 1.500 de residuos de actividad media y unos 20 de residuos de alta actividad.

Los residuos de baja actividad están constituidos por equipo variado, ropas, guantes, utensilios, etc. que se han usado en la planta. Su nivel de radioactividad es del orden del mineral natural de uranio, por lo que, aún no siendo muy peligrosos, requieren de un cierto cuidado. Existen también cantidades menores procedentes de hospitales, centros de investigación u otras industrias. Suponen menos del 1% de la cantidad total de radioactividad.

Los residuos de actividad media provienen casi en su totalidad de la industria nuclear. Son resinas, reactivos químicos y equipo que ha resultado contaminado. La manera habitual de proceder es depositarlos en el interior de bloques de hormigón. Su vida es relativamente corta, y no suponen más que un 4% de la cantidad total de radioactividad.

Es práctica habitual que los residuos de baja y media actividad se depositen en galerías subterráneas o naves industriales, que permitan el acceso a los mismos, en zonas sometidas a una adecuada vigilancia.

El problema real lo constituyen los residuos de alta actividad. La mayor parte de los mismos está formada por el combustible nuclear ya utilizado. Cada 1.000 kilogramos del combustible de uranio utilizado en un reactor de agua ligera, como los existentes en España, contiene 967 kilogramos de Uranio-238 y 33 kg de Uranio-235 (el elemento fisionable). Al cabo de tres años en el núcleo del reactor se habrá transformado en 943 kilogramos de Uranio-238, 8 kilogramos de Uranio-235, 8,9 kilo-

gramos de Plutonio, 4,6 kilogramos de Uranio-236, 0,65 kilogramos de varios elementos transuránicos y 35 kilogramos de varios otros productos de la fisión.

Una vez extraído este material del reactor, incluyendo también el resto del material estructural, se almacena inicialmente en piscinas de enfriamiento en la propia central. Durante este período tanto la radioactividad del material como el calor generado por ella decaen marcadamente: al cabo de un año es del orden de un 1% del valor inicial, y durante los diez años siguientes disminuye en un factor de cinco adicional. Llega un momento en que conviene tomar alguna decisión:

- **Reprocesar los residuos.** Esta es la política en Francia, Alemania, el Reino Unido, China, India, Pakistán o Japón. La principal razón es recuperar el uranio y el plutonio todavía presentes en los residuos. Una razón secundaria es reducir el volumen de residuos de alta actividad que han de ser fiablemente enterrados.

Los residuos nucleares se llevan a las plantas de reprocesado unos tres años después de su extracción del reactor, ya que el Plutonio-239 que se quiere emplear posteriormente como combustible nuclear tiene una vida media de 14 años (si se pospusiera mucho más el reprocesado habría podido decaer una proporción excesiva del mismo). Existen unas pocas instalaciones, muy complejas y capaces de efectuar el reprocesado, en Estados Unidos, Rusia, Francia, el Reino Unido, Japón, Pakistán, China y la India.

El reprocesado tiene la ventaja de que permite obtener mucha más energía del combustible nuclear. Idealmente, el reprocesado, junto a la construcción de reactores rápidos capaces de generar más combustible nuclear, permitiría multiplicar por más de 100 la energía producida a partir del mineral de uranio, eliminando completamente preocupaciones relativas a la seguridad del suministro durante un intervalo de

El problema del tratamiento de los residuos nucleares es uno de los más graves que presenta el uso de la energía nuclear

Las principales opciones sobre los residuos de alta actividad son reprocesar los residuos, almacenarlos de forma permanente, partir y transmutar los actínidos y productos de fisión de vida larga o posponer las decisiones

El reprocesamiento puede ser muy peligroso desde el punto de vista de proliferación del armamento nuclear

21

Hay además otra serie de temas más "filosóficos":

· ¿Hasta donde llega nuestra responsabilidad? ¿Son los nietos, el próximo siglo, el próximo milenio, un millón de años, para siempre...? Si se aplica una tasa de descuento, incluso muy baja (digamos, el 0,01% anual) a los daños causados, lo que suceda dentro de 100 siglos es esencialmente irrelevante. Por otra parte, mucha gente no aceptaría este argumento o similares, aduciendo razones éticas.

· ¿Cómo será la humanidad futura? Si el progreso científico del siglo pasado se mantiene en éste, no debiera tener grandes dificultades en localizar y tratar los residuos generados actualmente. Si descubren una cura para el cáncer, a lo mejor ni siquiera les merece la pena hacerlo, ya que podrían no suponer un gran riesgo para ellos. Por otra parte, si la civilización técnica actual no es más que un breve intervalo entre culturas más primitivas, podrían suponer un grave problema futuro.

· ¿Tiene sentido tratar el tema aisladamente? Las otras fuentes de energía, y en particular los combustibles fósiles, también presentan serios problemas ambientales. La cuestión racional nunca ha sido energía nuclear sí o no, sino más bien cual es el nivel adecuado de consumo energético y cómo mantenerlo.

tiempo suficiente para dar paso a otras tecnologías. El mayor problema es que el reprocesamiento puede ser muy peligroso desde el punto de vista de la proliferación del armamento nuclear, especialmente cuando se procesan elementos combustibles utilizados en un reactor moderado por agua pesada o grafito, ya que requieren la manipulación industrial de material fisionable muy puro.

· **Proceder al almacenamiento permanente de los residuos**, generalmente en formaciones geológicas. Ésta es la política en Suecia, Suiza y, oficialmente (aunque con dificultades en la práctica) en los EE.UU. Éste sería, en cualquier caso, el destino final de los residuos aunque se haya procedido a su reprocesado, aunque en este caso su volumen será menor.

Los residuos son vitrificados, introducidos en cápsulas de acero inoxidable, cobre y otros materiales escasamente corrosibles (además de otros materiales que cumplen otras medidas de seguridad) y, finalmente, enterrados en una formación geológicamente estable.

Para determinar el tiempo y condiciones de aislamiento, la evolución de la radioactividad del material es una información interesante, pero es más importante la actividad biológica del mismo. Ésta depende de varias cosas: lo fácilmente que se puede transportar a la biosfera, la facilidad con que el cuerpo humano puede asimilarlo, y los efectos que una vez asimilado pueda causar. Un punto de comparación interesante es el tiempo requerido para que la toxicidad de los residuos sea comparable a la del mineral natural de uranio. En este sentido los residuos de alta actividad tienen dos componentes. Una primera componente está formada por fragmentos varios de la fisión, y una segunda por elementos transuránicos. En el caso de los reactores más corrientes refrigerados por agua, la primera componente alcanza el punto crítico de toxicidad por ingestión en

unos 200 años, mientras que la segunda puede requerir hasta medio millón, siendo todavía diez veces más tóxica que el mineral natural al cabo de 20.000 años. Es de destacar que esta segunda componente puede ser destruida en reactores reproductores o en dispositivos basados en haces de partículas, tal como se discute más adelante.

Las normativas que se aplican requieren que el material permanezca seguro durante estos enormes intervalos de tiempo. En general, los geólogos pueden determinar que ciertas formaciones son seguras durante períodos de decenas o centenas de siglos. Más allá es muy difícil hacer predicciones, que no obstante las regulaciones existentes requieren. Por ejemplo, en los EE.UU. los depósitos de residuos debieran ser capaces de garantizar que nadie recibe dosis adicionales superiores a 0,2 milisievert/año durante los próximos 10.000 años (el nivel natural es del orden de 30 al año), o que no se producirá más de una muerte adicional por década debido a cáncer en las poblaciones próximas durante este período de tiempo (suponiendo que no son muy diferentes de las actuales). Desde luego, aunque se puede argumentar tanto a favor como en contra de estas regulaciones, la mera magnitud de las cifras involucradas, de carácter casi geológico, hace a veces difícil evitar cierta sensación de irrealidad al tratar este tema<sup>21</sup>.

- **La partición y transmutación de los actínidos y productos de fisión de vida larga.** La idea básica es someter a los residuos nucleares a un haz de partículas que provoquen la transmutación de los elementos radioactivos en otros más estables. Esto puede conseguirse con una generación neta de energía. Aunque estas instalaciones todavía están en fase pre-industrial, el desarrollo en los últimos años ha sido muy significativo, y ya se ha empezado a considerar su uso en gran escala. Con un volumen y peligrosidad de los residuos grandemente reducidos, los problemas relativos a su almacena-

miento se verían muy aliviados<sup>22</sup>. No obstante, es preciso realizar todavía un importante esfuerzo en investigación y desarrollo antes de pasar a su potencial aplicación industrial. España participa activamente en estos desarrollos.

Finalmente, es posible **posponer la decisión**, como en Canadá o España. Aunque esta decisión de no decidir es muy comprensible desde el punto de vista político, ya que cualquier decisión sobre el destino de los residuos nucleares es casi inevitable que sea sumamente impopular (en algún sitio habrá que construir el cementerio), llega un momento en que no es físicamente posible seguir acumulando desechos en las plantas de generación. En España nos estamos acercando rápidamente a este punto, por lo que sería sumamente conveniente que la sociedad española, representada en sus instituciones públicas, alcanzara un acuerdo razonable y estable.

### 3.3. Proliferación nuclear

Los orígenes de la industria nuclear están ligados a la fabricación de armas atómicas. Por tanto, siempre ha sido un motivo de preocupación la posibilidad de que la construcción de determinados reactores nucleares, aunque fuera para usos civiles, pudiera proporcionar a algunas naciones un medio mediante el cual desarrollarlas.

La fabricación de una bomba de fisión requiere cantidades relativamente puras de Plutonio-239, Uranio-235 o Uranio-233. En principio, 4 kilogramos de Plutonio-239 puro dentro de una esfera de berilio son ya una masa crítica, capaz de detonar. Esta cifra se modifica por la presencia del elemento Plutonio-240 (casi inevitable debido al proceso de transmutación de plutonio que tiene lugar en el reactor). Por otra parte, 15 kilogramos de Uranio-235 puro forman una masa crítica. Con uranio enriquecido al 20% (más fácil de obtener, pero sensiblemente más puro que el uranio

enriquecido al 3% de uso en reactores civiles) esta cantidad aumenta hasta 250 kilogramos, lo que haría prácticamente imposible la obtención de un arma nuclear.

La fabricación de armas nucleares basadas en la fusión del hidrógeno es técnicamente mucho más difícil, y en cualquier caso se requiere una bomba de fisión para cebar la fusión nuclear. Por otra parte, existe la posibilidad de incorporar material fisionable en una bomba química convencional, lo que causaría el daño adicional de la radioactividad dispersada a la de la propia explosión. Es la llamada "bomba sucia".

Hay en el mundo algunas naciones que reconocen públicamente el poseer arsenales nucleares (los EE.UU., Rusia, Francia, el Reino Unido, China, India y Paquistán, así como Corea del Norte). Algunas otras naciones (principalmente Israel, que podría contar incluso con bombas de fusión) poseen armas nucleares, aún cuando no lo reconocen públicamente. Finalmente, existen naciones como Alemania o el Japón que podrían desarrollar armas nucleares, pero que nunca han mostrado la intención de hacerlo.

En 1968 se firmó el Tratado de No-proliferación Nuclear (Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT). El tratado está firmado por unos 150 países, incluidas las principales potencias nucleares. Esencialmente las potencias nucleares se comprometen a no proporcionar armas atómicas o los medios de fabricarlas a estados no nucleares, y estos a no desarrollarlas o comprarlas<sup>23</sup>. Para verificar el cumplimiento del tratado, la Agencia Internacional de Energía Atómica está autorizada a inspeccionar las instalaciones nucleares de los países firmantes y llevar la contabilidad del material nuclear.

La consecuencia de todo ello es que hasta recientemente las naciones, como India, o Pakistán, que han querido desarrollar armas nucleares, no han firmado el NPT y las han fabricado uti-

Los elementos transuránicos (TRU) en una proporción del 1.1% y los fragmentos de fisión en una proporción del 4% son los componentes principales de los residuos radioactivos de los combustibles nucleares. Existe la posibilidad de fisionar o transmutar estos elementos en otros de vida más corta. Por ejemplo

$Tc99 [2.1 \times 10^5 a] + n @ g$   
 $+ Tc100 [15.8 seg] @ b + Ru100 [estable]$

Desde hace algunos años se está investigando en los procesos de transmutación con aceleradores acoplados a sistemas subcríticos que permiten obtener un número elevado de neutrones. En el CERN se realizaron en 1999 una serie de experimentos en los obtuvieron resultados que demostraban la factibilidad de eliminar los productos de fisión de vida larga mediante un sistema subcrítico acoplado a un acelerador

La eliminación del plutonio y otros actínidos produce una gran energía: 940 MW por día por 1 kilogramo. Como se pueden producir fisiones en el U-233, se puede estimar la energía liberada por los procesos de fisión: 1200 MW x día por cada kilogramo de actínidos. Mezclando un material fértil, Th-232, en el sistema subcrítico, se obtendría el material fisible U-233. Si se desarrolla este dispositivo, se podrían eliminar los actínidos (los productos de fisión de los elementos combustibles utilizados) producir un nuevo elemento fisionable, U-233 y generar energía.

Como, en cualquier caso, las potencias nucleares tienen de todas formas incentivos para cumplir lo que el tratado establece (aunque, como demuestra el caso de Israel con respecto a los EE.UU., puede que no sean lo bastante fuertes para que ejerzan una presión significativa) es preciso establecer algún incentivo hacia los estados no-nucleares. En algunos casos (por ejemplo, en el caso corriente de que, de cualquier manera, no iban a hacerlo) éste puede ser simplemente unas relaciones más fluidas. En otros casos, la promesa de ayudar al desarrollo de una industria nuclear civil ha ejercido este papel.

El número de centrales nucleares en el mundo continúa creciendo, especialmente en Asia Oriental

Las fuentes de energía renovable comparten con la energía nuclear varias características

lizando instalaciones civiles (reactores “de investigación”<sup>24</sup> no destinados a la producción de electricidad o reactores de potencia agua pesada). En este sentido, la industria nuclear civil no ha estado involucrada en el desarrollo de armas nucleares. Pero habría que preguntarse hasta qué punto la experiencia adquirida en la industria civil o en proyectos de investigación científica es relevante para una nación que desea obtener armas nucleares.

Un asunto crítico, en todo caso, es el desarrollo de instalaciones de enriquecimiento. Los EE.UU. tienen una política contraria a la extensión de este tipo de instalaciones, complementada con el ofrecimiento de sus propias instalaciones para el enriquecimiento del combustible de naciones sin armamento nuclear. Otros estados nucleares siguen políticas similares. La decisión estadounidense de no desarrollar el reprocesado comercial de plutonio está también relacionada con este tema. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la dependencia de las instalaciones de enriquecimiento sitas en terceros países puede conducir a la existencia de amenazas a la seguridad del suministro.

### 3.4. Comentarios finales

Contra lo que parece ser una percepción generalizada, el número de centrales nucleares en el mundo continúa creciendo, especialmente en Asia Oriental. Por otra parte, el Tratado de No-Proliferación está en un estado crítico, entre otras razones debido a la generalizada percepción entre las potencias no nucleares de que las nucleares carecen de voluntad real de reducir sus arsenales. En efecto, cabe esperar que las fuentes de energía que se extiendan en el mundo en desarrollo sean básicamente las que se implanten en el mundo desarrollado. Por otra parte, la renuncia europea y norteamericana a seguir esta vía no parece que vaya

a afectar en gran medida a la política de China, India o Pakistán, con el agravante de que los diseños que se construyan podrían estar basados en mayor medida en esfuerzos puramente nacionales.

En cualquier caso, dado que el 80% del consumo primario de energía es de origen fósil, la substitución de una parte significativa del mismo por otra fuente de energía, sea de naturaleza nuclear o de cualquier otro tipo, requeriría la expansión masiva de estas instalaciones. Por tanto, los posibles problemas deben analizarse con detenimiento, dadas la enormes magnitudes globales implicadas.

## 4. Energías renovables

Las tecnologías basadas en energías renovables son un cajón de sastre donde entran, tanto fuentes utilizadas desde hace muchos años como la hidroeléctrica, hasta otras todavía lejos de su uso comercial como las de las olas, pasando por fuentes que sólo recientemente han alcanzado tanto su madurez técnica, como la eólica. Esta disparidad se manifiesta en el amplio grado de variación de los costes de producción de las diversas tecnologías, tal como se muestra en la figura 4 Como referencia, el coste de producción en una central convencional de carbón es del orden de 40 €/MWh<sup>25</sup>.

Todas estas fuentes, con la excepción de las basadas en la biomasa y la solar térmica, comparten con la energía nuclear varias características. Primeramente son fuentes de generación eléctrica. Por tanto, no evitan la necesidad de desarrollar vectores energéticos para el transporte. En segundo lugar, son fuentes muy intensivas en capital, por lo que su coste está muy ligado al de la evolución de los tipos de interés. Los recursos renovables se encuentran ampliamente distribuidos, lo que contribuye a la seguridad del suministro. Finalmente, algunas requieren todavía,

24

Quizá sea adecuado indicar que una instalación de investigación y una destinada a la fabricación de armamento nuclear son de hecho muy diferentes. Los reactores de investigación reales producen cantidades de material fisible del todo irrelevantes para fines militares.

25

Como cifra meramente orientativa, y que no es necesariamente a la que debiera ser remunerada en un mercado competitivo con mezcla de tecnologías

como la nuclear, de un esfuerzo sostenido de investigación y desarrollo<sup>26</sup>.

También existen, naturalmente, importantes diferencias. Una de las más importantes se refiere a las economías de escala. Una central nuclear de mucho menos de 1000 MW no es económicamente rentable. Por el contrario, una gran parte de las fuentes renovables admiten su desarrollo en una escala substancialmente menor (aunque quizá no todas, piénsese en una gran central hidroeléctrica)<sup>27</sup>.

La segunda es la que se refiere a su intermitencia. El viento sopla por donde quiere, hay años húmedos y secos, y hay días luminosos y nublados. Por tanto, en el coste de un desarrollo renovable hay que incluir el de la capacidad convencional, normalmente basada en centrales fósiles o nucleares, necesarias para suministrar la demanda en el caso de que alguna fluctuación climática cause una falta de generación renovable. No hacerlo así puede poner en peligro la seguridad del suministro.

No obstante, en algunos países como España la situación puede ser más favorable. Ello es debido a que se dispone de una capacidad de almacenamiento de agua en embalses apreciable, que puede emplearse para generar electricidad compensando las fluctuaciones

de otras fuentes de energía renovable, como la eólica. Aunque esto tiene también un coste (el de oportunidad de no poder usar entonces el agua en otros momentos para sustituir centrales térmicas caras) es una circunstancia que no se da en todos los países.

Estos problemas pueden mitigarse en gran medida mediante la construcción de infraestructuras de transporte eléctrico, o la creación de microrredes. En efecto, cuanto mayor sea la región de donde se obtiene la energía, sea eólica, solar o hidráulica, tanto menor será, por razones estadísticas, la fluctuación relativa de la producción con respecto a la producción esperada, y por tanto menor el respaldo convencional necesario. En este sentido, la construcción de infraestructuras de transporte puede ser una de las medidas de apoyo a la penetración renovable más eficaces. Quizá la conclusión lógica de esta idea la propuso Buckminster Fuller: una red eléctrica planetaria que aproveche el hecho de que siempre es de día en la mitad del mundo.

Existe incertidumbre en lo referente a los recursos renovables realmente disponibles. La figura 5 muestra una estimación del potencial en la antigua Unión Europea de 15 miembros. En este tipo de estimaciones es necesario tener en cuenta que los recursos son

La construcción de infraestructuras de transporte puede ser una de las medidas de apoyo a la penetración renovable más eficaces

26

De hecho, aunque ha decrecido marcadamente en los últimos tiempos, al menos la energía nuclear ha gozado históricamente de un apoyo apreciable en investigación. El esfuerzo en renovables ha sido en general más reciente y menos intenso.

27

No obstante, existen instalaciones mini y microhidráulicas que requieren de esfuerzos de inversión muy moderados (véase más adelante).

28

Reinhard Haas, Gustav Resch, Claus Huber, Thomas Faber. Potentials and support schemes for Potentials and support schemes for electricity from renewable energy sources (RES (RES-E) in Europe) in Europe. Energy Economics Group (EEG), Vienna University of Technology, Vienna University of Technology, Institute of Power Systems and Energy. <http://eeg.tuwien.ac.at> Presentado en la conferencia SESA "Investment for sustainability". Madrid, 19 y 20 Mayo de 2005.

Figura 4. Costes de producción de generación eléctrica renovable<sup>28</sup>

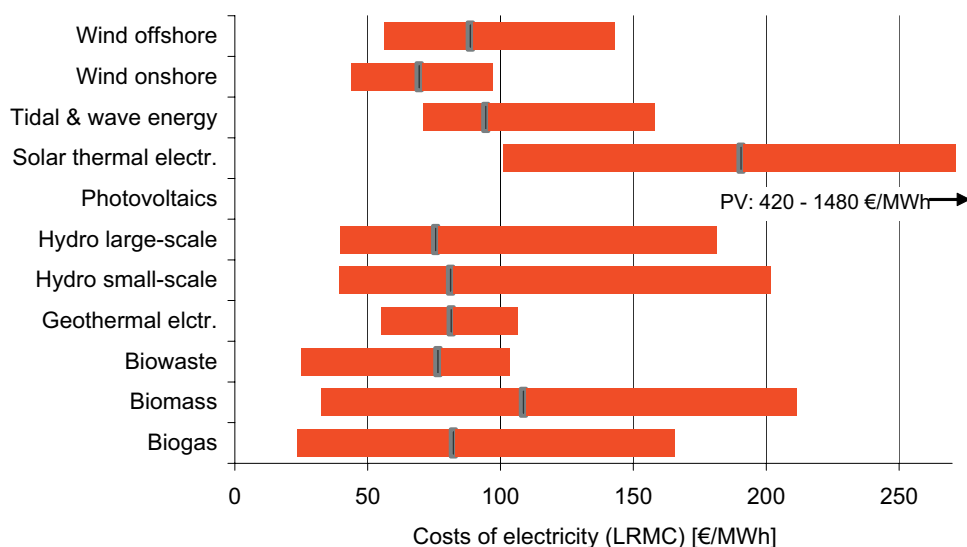
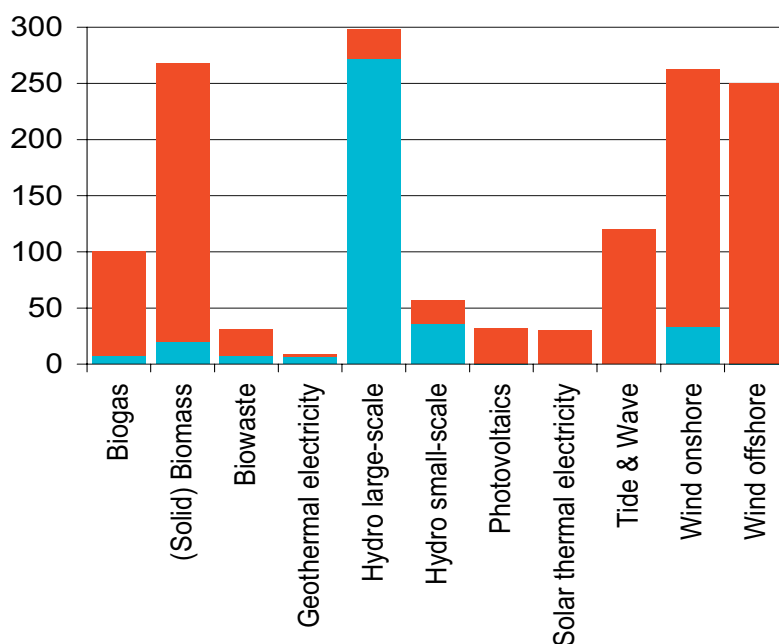


Figura 5. Potencial de generación renovable (TWh/año) en UE-15. Azul: ya realizado, Rojo: potencial<sup>29</sup>



29

Ídem a la nota anterior

30

World in transition: towards sustainable energy systems. German Advisory Council on Climate Change, 2001.

31

El proyecto ExternE, financiado por la Comisión Europea desde 1992, y que con distintos nombres ha seguido trabajando hasta la actualidad, ha tratado de cuantificar los costes ambientales de las tecnologías de generación eléctrica, incluyendo algunas renovables. Si bien en este caso los costes obtenidos son muy discutibles, por la elevada especificidad de los daños (o incluso beneficios) causados por instalaciones tales como parques eólicos o centrales hidráulicas, se puede mencionar como primera aproximación que, mientras los costes externos de una central de carbón son del mismo orden de magnitud que el coste de operación (valor medio de 40€/MWh), los costes de las renovables son un orden de magnitud inferior (2€/MWh para la hidráulica y la eólica), al igual que los de la nuclear (cuyos resultados también son ciertamente discutibles, básicamente por su elevada dependencia de la tasa de descuento).

dependientes entre otras cosas del capital que se esté dispuesto a invertir, que a su vez dependerá del precio de la energía (un precio más alto justificaría inversiones que en otras circunstancias no se contemplarían, por lo que llevará a una estimación de recursos más elevada).

Se puede apreciar que solamente la energía hidroeléctrica ha alcanzado en la Unión Europea un cierto grado de saturación. En cuanto a las demás, existe todavía un apreciable potencial. Las cifras a nivel global son, en principio, más favorables, con un gran potencial disponible. Pensemos en los grandes sistemas fluviales de África y América, la mayor insolación en la mayor parte del mundo en relación al relativamente boreal continente europeo, y la menor densidad de población existente. Se han avanzado cifras, a nivel global, de un potencial de largo plazo (circa 2100) de 4.500 TWh/año de generación hidráulica, 30.000 de bioenergías, 42.000 de energía eólica, 300.000 de energía solar, 9.000 de energía geotérmica y 9.000 de otros tipos de energías renovables<sup>30</sup> (el consumo global de energía primaria es actualmente de unos 120.000 TWh/año). Aunque estas

cifras concretas sean discutibles, es también claro que el potencial existente está muy lejos de encontrarse agotado.

Por último, parece interesante hacer referencia al problema de los subsidios públicos: dado que las energías renovables en general no son competitivas con las tradicionales (salvo excepciones, especialmente mientras éstas no incorporen el coste del impacto medioambiental que ocasionan), su desarrollo se está realizando a costa de subsidios públicos, en algunos casos muy elevados. Mientras no se expliciten adecuadamente estos costes medioambientales<sup>31</sup> cabe siempre cuestionarse la eficiencia social de estos subsidios, e incluso su efectividad real en la promoción de algunas tecnologías. También la aparente incongruencia de apoyar simultáneamente tecnologías no renovables y claramente desfavorables para los objetivos de sostenibilidad a largo plazo del modelo energético. Claramente se precisa una estrategia energética coherente y de largo plazo.

Como ya se ha comentado, existe una gran variabilidad dentro del cajón de las energías renovables. A continuación se



tratará de particularizar los aspectos comentados para cada una de ellas.

#### 4.1. Energía hidráulica

La energía hidráulica es una vieja conocida del sector energético. Su uso se remonta a los orígenes de la generación eléctrica, y por tanto sus implicaciones han sido ampliamente estudiadas.

Su potencial, como ya se ha comentado, resulta bastante limitado en la Unión Europea, en especial en lo que se refiere a la gran hidráulica (generalmente se conocen así las instalaciones mayores de 10-50 MW, según el país). En Europa, casi todos los emplazamientos favorables están ya casi ocupados. Otro tema es su utilización en países en vías de desarrollo. En estos países todavía quedan numerosos emplazamientos susceptibles de aprovechamiento hidráulico. Aunque aquí la realidad de su utilización choca con numerosas limitaciones: elevada necesidad de inversión, posibles impactos ambientales significativos, y también consecuencias sociales debido al desplazamiento de población asociado. Si bien algunos países, debido fundamentalmente a su organización política, son capaces de superar estos obstáculos (no sabemos si para bien o para mal, véase el caso de las Tres Gargantas en China), hay otros países donde el potencial técnico no será posiblemente aprovechable en términos reales.

Sin embargo, debe recordarse que la energía hidráulica, por su capacidad de almacenamiento, es capaz de mitigar ciertas limitaciones asociadas a las energías renovables de carácter intermitente (ver a continuación). Por tanto, parece que un desarrollo elevado de éstas se vería favorecido por una elevada contribución de la primera.

Los principales riesgos de la gran hidráulica están asociados al impacto ambiental asociado a su elevada ocupación del territorio, y al riesgo de rotura de la presa. En lo que se refiere al

impacto ambiental, como ya se ha dicho, básicamente consiste en la modificación o eliminación de ecosistemas, por su inundación. Si bien este efecto negativo a veces se considera atenuado por otros efectos positivos de los embalses (capacidad de regulación del flujo de agua, posible utilización para regadío, usos recreativos), los resultados en general muestran un cierto impacto negativo, aunque no tan elevado como el de las energías fósiles. No obstante las últimas construcciones realizadas en Europa, como la presa construida en las proximidades de Viena, han sido llevadas a cabo, a un coste más elevado, sin romper el equilibrio de los ecosistemas

En cuanto al riesgo de rotura de presa, aspecto muy pocas veces considerado, existen casos bien documentados sobre la ocurrencia y consecuencias de la rotura de una presa en distintos países, basados en incidentes pasados (en España es fácil citar Tous o Ribadelago). Algunos estudios apuntan a que la probabilidad de rotura de una presa es similar a la de un accidente muy severo en un reactor nuclear. Evidentemente, las consecuencias serán distintas según el contexto.

En lo que se refiere a la pequeña hidráulica o minihidráulica (según el país, instalaciones menores de 10 ó 50 MW), debido a su pequeño tamaño, suponen generalmente un impacto ambiental mucho más reducido. Muchas de ellas son centrales hidráulicas fluyentes, y por tanto sin embalse asociado, y también muchas de ellas se basan en una desviación de caudal, por tanto sin establecer obstáculos en el cauce principal del río. Así, habitualmente, no se considera que esta tecnología tenga un impacto negativo, salvo en emplazamientos específicos.

Por otra parte, esta tecnología sí tiene un cierto potencial de crecimiento, incluso en países desarrollados. La principal barrera para su desarrollo reside en la lentitud de los procesos administrativos de autorización, que, dado el pequeño tamaño de estas instalacio-

La energía hidráulica es capaz de mitigar ciertas limitaciones asociadas a las energías renovables de carácter intermitente

Los principales riesgos de la gran hidráulica están asociados al impacto ambiental asociado a su elevada ocupación del territorio y al riesgo de rotura de la presa

nes, supone unos costes relativamente altos de gestión e inmovilización del capital. Sin embargo, generalmente la energía minihidráulica no tiene capacidad de regular su producción, lo que no contribuye a la mejora de la seguridad de suministro en igual medida que la gran hidráulica.

Las expectativas que generó la biomasa no se han realizado porque han presentado algunos problemas. no obstante, su potencial sigue siendo elevado

## 4.2. Energía de la biomasa

La energía de la biomasa ha sido la gran promesa de las energías renovables: en todos los planes de desarrollo de energías renovables se preveía que aportaría la mayor contribución, desde el punto de vista energético, a la consecución de los objetivos propuestos. Sin embargo, esta gran promesa no se ha visto realizada, fundamentalmente por las siguientes razones:

- El interés de utilizar la biomasa fundamentalmente para la generación eléctrica, cuando las centrales posibles son de potencia reducida y de bajo rendimiento
- El énfasis en la utilización de los residuos como fuente principal de biomasa
- La ausencia de cultivos energéticos que puedan suministrar una biomasa de forma programada
- La ausencia, hasta años recientes, de un programa de desarrollo y utilización de biocarburantes, como existe en otros países europeos

Sin embargo, todavía siguen existiendo razones de peso para apoyar el desarrollo de la biomasa, y para corregir los errores citados, por los aspectos que se refieren a continuación.

Su potencial es elevado, sobre todo en regiones como Europa con grandes excedentes agrícolas. Aunque en la situación actual de la tecnología es difícil que pueda contribuir a proporcionar más de un 10-15% de la energía primaria, avances previstos a corto plazo como el desarrollo comercial de la hidrólisis

enzimática de la celulosa podrían hacer que lo hiciera en mayor proporción<sup>32</sup>. La mayor parte de la biomasa provendría de cultivos energéticos, es decir, cultivos específicos para la producción de energía, que sustituirían a cultivos tradicionales excedentarios (o los complementarían). Si bien hay otras fuentes de biomasa más baratas, y de hecho competitivas en la actualidad, como los residuos forestales, agrícolas o ganaderos, las perspectivas de crecimiento de estos no son grandes, por lo que todo el crecimiento futuro debe provenir de los cultivos energéticos.

El hecho de poder ser cultivada hace que se convierta en una alternativa muy interesante para el sector agrícola en una era de producción creciente y precios decrecientes. La biomasa generalmente debe ser utilizada a nivel local, por lo que no aparece tanto el peligro de la competencia exterior (salvo algunos casos que se comentan posteriormente). Por ello, desde muchas instituciones se considera un elemento fundamental para el mantenimiento de las rentas agrarias.

Además, y dado este carácter local, la biomasa se considera generalmente como una fuente energética autóctona, y por tanto que contribuye a la seguridad de suministro (aunque en este aspecto puede haber matices, tal como se comenta más abajo). También desde este punto de vista, hay que citar que al tener la biomasa carácter almacenable (aunque no a muy largo plazo) puede contribuir a regular la producción energética total del sistema, y por tanto a amortiguar posibles diferencias en producción de otras fuentes energéticas de carácter intermitente.

La biomasa, en su vertiente biocarburantes, tiene una utilización directa para el transporte, que como sabemos es uno de los sectores energéticos con mayor crecimiento. Si bien existen algunos estudios que muestran un balance energético negativo de algunos biocarburantes, lo cierto es que una producción adecuada puede ser ventajosa respecto a la sustitución de com-

La biomasa se considera generalmente como una fuente energética autóctona y, por tanto, que contribuye a la seguridad del suministro

32

Greene, N., F.E. Celik, B. Dale, M. Jackson, K. Jayawardhana, H. Jin, E.D. Larson, M. Laser, L. Lynd, D. MacKenzie, J. Mark, J. McBride, S. McLaughlin, D. Saccardi. 2004. Growing energy. How biofuels can help end America's oil dependence.

bustibles fósiles, y por ello es promovida desde muchos ámbitos.

Otra ventaja de la biomasa es que, generalmente, se considera que las emisiones netas de CO<sub>2</sub> que producen son pequeñas o incluso nulas: es decir, que el CO<sub>2</sub> emitido al producir energía a partir de la biomasa es igual o inferior al que ha fijado la planta al crecer (esto depende del tipo de biomasa y de su proceso de producción, por ejemplo las emisiones de algunos tipos de biocombustibles sí pueden ser positivas).

Sin embargo, la biomasa también presenta problemas, como los que se citan a continuación:

En primer lugar, la biomasa no está exenta de impactos ambientales: su cultivo puede contribuir a la contaminación agraria difusa (por el uso no racional de pesticidas y fertilizantes), y también puede producir alteraciones en los ecosistemas. Incluso en algunas zonas podría verse incentivada la deforestación de zonas vírgenes, lo cual añadiría a estos impactos unas mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, amén del posible impacto en la biodiversidad.

En segundo lugar, el carácter autóctono de la biomasa no siempre tiene por qué mantenerse. Un ejemplo interesante en este sentido es el de los biocombustibles, por ejemplo el aceite de colza o de soja para producir biodiesel, cuya producción es más barata en otros países, y cuya alta densidad energética sí permite su transporte a largas distancias. En estos casos, parece bastante más interesante desde el punto de vista económico no producir la biomasa localmente, sino en estos países (como Brasil o Argentina). Sin embargo, esto supone perder en seguridad de suministro.

Por último, es interesante comentar algo acerca de la mayor preocupación que surge habitualmente acerca de la biomasa, y es la disponibilidad de tierra para que ésta realmente pueda ser una alternativa relevante de suministro energético, y su posible competencia con los cultivos agrícolas por dicha tie-

rra. Existen estudios pesimistas, que mantienen que la biomasa no sería capaz de satisfacer una parte significativa de la demanda energética más que desplazando a los cultivos agrícolas actuales (y por ello encareciendo el precio de estos últimos), y ni en estas circunstancias habría tierra suficiente. Otros estudios, en cambio, argumentan que estos estudios pesimistas están basados en una mala utilización de la biomasa (como por ejemplo las tecnologías actuales de producción de electricidad, etanol o biodiesel) y defienden que, con otras hipótesis y un progreso tecnológico nada espectacular, la biomasa sería capaz de satisfacer la demanda energética incluso con muy pequeños aumentos de la superficie cultivada actualmente<sup>33</sup>.

#### 4.3. Energía eólica

La energía eólica, si bien ha sido utilizada por el hombre desde tiempos ancestrales, experimentó un gran desarrollo a partir de la primera crisis del petróleo, y ahora se puede considerar ya como una tecnología comercialmente madura, y en muchas ocasiones competitiva con las tradicionales. Esto ha hecho que los niveles de potencia instalada sean ya muy significativos en muchos países, y que en algunos de ellos la contribución de la energía eólica a la producción total de electricidad sea muy significativa. En otros países el potencial está aún por desarrollar.

Además, incluso en aquellos países en que el desarrollo ya es importante parece que todavía hay un potencial significativo para esta tecnología, especialmente en su vertiente offshore (marina). Efectivamente, en algunos países (sobre todo europeos) la gran mayoría de los emplazamientos idóneos en tierra ya han sido ocupados en muchos países, y su extensión choca como veremos con posibles problemas medioambientales. Por ello la posible expansión en estas regiones reside en la instalación de parques eólicos en el

La biomasa no está exenta de impactos ambientales: su cultivo puede contribuir a la contaminación agraria difusa y puede producir alteraciones en los ecosistemas

La energía eólica se puede considerar ya como una tecnología comercialmente madura, y en muchas ocasiones competitiva con las tradicionales

33

Greene, N., F.E. Celik, B. Dale, M. Jackson, K. Jayawardhana, H. Jin, E.D. Larson, M. Laser, L. Lynd, D. MacKenzie, J. Mark, J. McBride, S. McLaughlin, D. Saccardi. 2004. Growing energy. How biofuels can help end America's oil dependence.

Los elementos de riesgo de la energía eólica están asociados al elevado coste de capital, a la variabilidad de la producción, a su integración en el sistema eléctrico, y al posible impacto ambiental

mar, generalmente en plataformas continentales con poca profundidad (en España esta podría no ser una opción tan interesante, debido a la escasez de terreno disponible en estas plataformas). Si bien estos desarrollos tienen un coste de inversión mayor, tanto por su novedad como por los mayores requerimientos impuestos por la dureza del emplazamiento, también tienen una mayor capacidad de producción al ser en general mayores los vientos en zonas marinas.

Los elementos de riesgo de la energía eólica están asociados al elevado coste de capital, a la variabilidad de la producción, a su integración en el sistema eléctrico, y al posible impacto ambiental.

El primer aspecto, por cierto común con la energía nuclear, se ha tratado ya al principio de esta sección. El segundo, la variabilidad de la producción, supone que, en principio, la energía eólica no puede garantizar el suministro (especialmente en potencia, en energía es algo más fiable). Sin embargo, existen distintos avances en este área que van consiguiendo una mayor seguridad: por una parte, los modelos de previsión de producción van consiguiendo unas predicciones cada vez más ajustadas (ahora mismo el nivel de error se sitúa en un 25%), aunque siempre a muy corto plazo (24-48h). Por otra parte, el extender la instalación de parques a zonas distintas hace que la variabilidad se atenúe. La instalación en zonas marinas también reduce la variabilidad, por el carácter más constante de los vientos en estas zonas. Y por último, existen propuestas para tratar de almacenar la energía eólica con vistas a una mayor seguridad de suministro (volantes de inercia, producción de hidrógeno, etc.).

Ahora mismo uno de los asuntos de mayor importancia respecto a la energía eólica es su integración en el sistema eléctrico: los aerogeneradores, por su demanda de energía reactiva,

su respuesta a huecos de tensión, y su la intermitencia de su operación, presentan problemas para la operación eficiente del sistema eléctrico. Pero de nuevo, existen ya importantes avances que permiten a las máquinas responder de manera adecuada: la electrónica de potencia está resolviendo los problemas de reactiva y de huecos de tensión, y el telecomando y los modelos de previsión permiten la gestión centralizada de los parques desde el operador del sistema.

Por último, también hay que mencionar los problemas medioambientales de la energía eólica, de los cuales los fundamentales son su impacto visual y su impacto en la avifauna. En general, hay que decir que en zonas con baja densidad de población y de aerogeneradores, ninguno de ellos es un problema, salvo en zonas de especial valor ecológico o en rutas migratorias para las aves (que por tanto habría que evitar). Los problemas surgen cuando los aerogeneradores se instalan en una elevada densidad, y en zonas muy pobladas (como es el caso de Dinamarca o el norte de Alemania). En estas zonas la población ya está empezando a reaccionar en contra, y la avifauna empieza a tener problemas para sortear las máquinas (algo que por otra parte hacen generalmente bien con bajas densidades de máquinas).

#### 4.4. Energía solar térmica

La energía solar térmica tiene varias posibilidades de utilización: solar térmica de baja temperatura (para agua caliente sanitaria y calefacción), solar térmica de media y alta temperatura (para producción de electricidad, hidrógeno o calor industrial). Dadas las grandes diferencias entre ellas, las trataremos de forma separada.

Los problemas mediambientales de la energía eólica, de los cuales los fundamentales son su impacto visual y su impacto en la avifauna

#### 4.4.1. Solar térmica de baja temperatura

La energía solar térmica de baja temperatura se aprovecha mediante los llamados colectores solares. Estos son placas metálicas por las que circula un líquido termoportador (generalmente agua), que se calienta al pasar por el colector, y que posteriormente pasa a un intercambiador donde transfiere su calor al circuito de agua sanitaria o de calefacción del edificio. Generalmente se utiliza únicamente para producir agua caliente y calefacción por suelo radiante, aunque desarrollos recientes (colectores de vacío) ya permiten alcanzar las mayores temperaturas necesarias para dar servicio de calefacción concentrada.

Esta tecnología es comercialmente madura desde hace bastantes años, aunque su aplicación es bastante escasa en España, en parte por la falta de calidad de los productos que inicialmente se comercializaron, y en muchos otros países, algo que resulta sorprendente. Efectivamente, es una tecnología competitiva (las inversiones se recuperan en 4-6 años según las zonas), de bajo mantenimiento, y de fácil instalación. No hay riesgos significativos, a excepción del principal factor que ha demorado su aplicación hasta el momento (en

España, que no en otros países): la falta de profesionales especializados en su instalación<sup>34</sup>, y un control adecuado de la calidad de los productos. Sin embargo, esto no ha sucedido así en otros países (ni está sucediendo ahora mismo en España), por lo que su desarrollo en Alemania o Grecia es muy elevado.

El principal obstáculo a su desarrollo, aparte de la mala fama, es el sistema de promoción inmobiliaria: muchos de los edificios son construidos por alguien distinto al que los va a ocupar posteriormente. Esto supone que los costes de inversión mayores que supone la instalación de colectores solares no sean recuperados por el constructor, sino por el inquilino, y a veces resulta difícil trasladar estos costes (como sucede con muchas otras prácticas de eficiencia energética en la edificación). Una manera de superar esta barrera es el establecimiento de códigos de edificación que impongan su instalación, tal como hace el reciente Código Técnico de la Edificación aprobado en España en 2006. Esta obligatoriedad posiblemente suponga un gran estímulo para la instalación de esta tecnología (y también para todos los demás aspectos relacionados con la eficiencia energética en la edificación).

Le energía solar térmica de baja temperatura es comercialmente madura desde hace bastantes años, aunque su aplicación en España es bastante escasa

Figura 6. Colectores cilindroparábólicos



34

Efectivamente, esta tecnología tuvo un importante desarrollo en los años 80, con un gran número de instalaciones. Sin embargo, el hecho de que muchas de ellas fueran realizadas por técnicos no preparados hizo que muchas presentaran problemas a los pocos meses o años, y esto generó un importante descontento entre los usuarios, que se extendió rápidamente resultando en que la energía solar térmica de baja temperatura fuese rechazada por su poca fiabilidad.

Figura 7. Central de torre central



#### 4.4.2. Solar térmica de media y alta temperatura

En sus distintas vertientes tecnológicas (colectores cilindroparábolicos, torre central o disco parabólico), esta tecnología de generación de electricidad y calor se muestra ya cercana a su madurez comercial. Existen ya numerosos proyectos en desarrollo en España y otros países.

Sus costes siguen siendo elevados (aunque menores que los de la energía solar fotovoltaica), pero se van aproximando al resto de energías convencionales. Posiblemente las economías de escala a conseguir cuando se instalen más centrales y se alcance la madurez le permitan ser competitiva, aunque no se prevé que esto ocurra antes de 10-15 años.

Su potencial es muy elevado, aunque limitado a determinadas zonas geográficas por su necesidad de disponer únicamente de la radiación solar directa, no difusa, lo que se traduce en latitudes cercanas a los 40°N o S (en las que se encuentra España).

Su contribución a la seguridad de suministro tiene dos caras: por una parte, su recurso es muy abundante en muchas zonas, pero variable (aunque bastante

más predecible que el viento); por otra parte, generalmente estas centrales se diseñan con cierta capacidad de almacenamiento (diaria), lo cual permite eliminar en gran medida la variabilidad del recurso que utilizan. También es habitual incluir en su diseño cierta combinación con gas natural (centrales híbridas) que contribuye a reducir su intermitencia.

El riesgo asociado a esta tecnología se halla en su todavía falta de madurez comercial, y también en su elevada necesidad de terreno. Efectivamente, la energía solar térmica de media y alta temperatura necesita de elevadas superficies donde instalar los colectores, discos o heliostatos encargados de recoger y concentrar la radiación solar. Esto hace que, por tanto, haya que buscar zonas relativamente despobladas donde instalar las centrales. Es cierto que en muchas de las zonas idóneas para las centrales existen grandes extensiones no pobladas (véanse los desiertos norafricanos), pero por otra parte, al estar basada su generación de energía en un ciclo termodinámico, las centrales requieren agua para su refrigeración, que puede escasear en estas zonas. Por tanto, aunque su potencial es elevado, puede ser complicado encontrar áreas idóneas para su instalación.

La energía solar fotovoltaica tiene un potencial muy elevado y es un recurso variable, pero predecible en cierta medida

La energía solar de alta temperatura puede ser la fuente futura de hidrógeno, vector energético del futuro, por reacción termoquímica. La investigación está iniciada y parece ser de gran interés.

#### 4.5. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica presenta características similares en cuanto a sus riesgos a los de la solar térmica: tiene un potencial muy elevado (en este caso no sujeto a determinadas latitudes), y un recurso variable aunque predecible en cierta medida. Por otra parte, también presenta aspectos distintos.

En primer lugar, su coste es mucho más elevado. Si bien la rentabilidad económica para los inversores es buena en algunos países (véase la fiebre por instalar granjas solares en España), esto se debe únicamente a los elevados subsidios que se conceden a esta tecnología, aspecto que como ya se ha comentado podría ser cuestionable desde el punto de vista de la eficiencia económica global (en muchos ámbitos se considera más apropiado para esta tecnología un mayor apoyo a la I+D, aunque también es cierto que los subsidios contribuyen a estimular el mercado). En una situación sin subsidios, la energía solar fotovoltaica sólo resulta competitiva en emplazamientos alejados de la red eléctrica, tales como zonas rurales. De hecho, es la tecnología más utilizada para electrificación rural en países en vías de desarrollo.

En segundo lugar, la integración de los paneles solares en los edificios es mucho más fácil (más aún si conside-

ramos las tecnologías de lámina delgada que se integran en las ventanas o paramentos acristalados). Por tanto, en este caso el potencial no está limitado por su necesidad de terreno, ya que en general hay una gran disponibilidad en los edificios ya construidos o por construir. Este mismo aspecto es el que hace que el impacto medioambiental de los paneles fotovoltaicos sea despreciable.

Respecto a este último apartado, se ha comentado en algunos foros el posible impacto asociado a los componentes tóxicos como el cadmio utilizado en la fabricación de los paneles. Sin embargo, este tipo de materiales ya han sido abandonados y por tanto no parece haber impactos significativos. Por último, su madurez comercial en cuanto a fiabilidad, soporte, etc., está más que demostrada

### 5. Conclusión

En el sector de la energía, como en los demás, el riesgo está siempre asociado a la oportunidad. Una política sensata debe intentar evitar los primeros y buscar las segundas, y esto implica no apostar ciegamente por ninguna opción, sino explorar el mayor número posible de ellas, hasta que nos convenzamos más allá de cualquier duda de lo adecuado o indeseable de las mismas.

Nada de esto es peculiar de la energía. Sí lo es la enorme magnitud de las cifras involucradas. Por ello, debe discutirse de forma razonable, cuidadosa y exhaustiva. Mucho nos jugamos en ello.