

## En la frontera de la investigación en energía

**E**L debate sobre la energía se centra en el dilema de cómo atender las necesidades del creciente consumo, garantizando los recursos, al tiempo que se minimiza el impacto social de la generación. En consecuencia el diseño de un plan energético ha de tener en cuenta los siguientes aspectos: 1) asegurar el suministro, 2) reducir la dependencia exterior, 3) diversificar las fuentes energéticas y 4) evitar el cambio climático, así como las causas del rechazo social a otras fuentes energéticas masivas como la nuclear. En este contexto la ciencia y la tecnología son herramientas fundamentales para contribuir a un desarrollo sostenible, conocido y respaldado por los ciudadanos.

Quizás sea esta una ocasión más, y muy importante, para reducir el creciente divorcio entre ciencia & tecnología y sociedad de acuerdo con una frase de José Martí referida a la educación, y adaptada al caso "Es inmoral el divorcio que existe entre la ciencia y tecnología de una época y la época", y con otra de Carl Sagan alertando sobre los defectos de nuestro sistema de ciencia y tecnología globalizados "Hemos organizado una civilización global en la que los elementos cruciales dependen de la ciencia y la tecnología. También hemos organizado las cosas de forma que casi nadie entiende ni de ciencia ni de tecnología. Son las condiciones idóneas para el desastre. Podremos quizá continuar una temporada más pero más pronto o más tarde esta mezcla, combustible de ignorancia y poder nos estallará entre las manos".

### Introducción

El International Energy Outlook, IEO2005, publicado anualmente por la Energy Information Administration, presenta varias previsiones para la evolución de los mercados energéticos internacionales. De acuerdo con sus últimas estimaciones, la demanda de energía crecerá en un 50% desde hoy al 2030 y la de energía doméstica lo hará también, sobre todo en las economías emergentes, debido al aumento de la población y al previsible y deseable crecimiento económico. Los sectores de la industria y el transporte serán los de mayor crecimiento de la demanda, siendo algo más lento en los sectores residencial y comercial, mientras que el sector de uso final tendrá grandes diferencias según el desarrollo económico de la región.

El consumo de electricidad será de  $21\,400 \times 10^9$  kWh en el 2030, casi dos veces el actual. Más de la mitad de este consumo será debido al aumento de la demanda en los países con economías emergentes. Se prevé que el gas y el carbón cubrirán más del 60% de las necesidades. Se estima que el consumo de electricidad de origen nuclear crecerá poco, alrededor de un 5% respecto al 2002, alcanzando los  $3270 \times 10^9$  kWh. La electricidad hidráulica y la de origen renovable mantendrán su



**Juan Antonio Rubio**

Director General del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (CIEMAT). Es Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Ha desarrollado su trayectoria como investigador y gestor entre el CIEMAT y el CERN, la organización europea de investigación en Física de altas energías. Es Profesor Honorario del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de La Habana. [juanantonio.rubio@ciemat.es](mailto:juanantonio.rubio@ciemat.es)

porcentaje actual del 18% en el conjunto de la generación, aunque su mercado aumentará en un 54% durante los próximos 20 años.

El mismo informe prevé que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarán, siendo para el año 2025 un 58% más altas que las producidas en el 2002. La mayor parte de este incremento se deberá a las economías emergentes, que harán mayor uso de los combustibles fósiles.

Para cubrir la demanda estimada las fuentes energéticas masivas son, en la actualidad, los combustibles fósiles y la nuclear. Los combustibles fósiles: carbón, gas y petróleo, cubren actualmente el 80% del consumo energético, 23%, 21% y 36% respectivamente, situación que es previsible continúe, con leves variaciones, en las próximas dos décadas. La energía nuclear supone 7% del consumo, pero su crecimiento resulta difícil de predecir, por múltiples razones, entre ellas el aumento del precio de los combustibles fósiles. Ambas tecnologías se enfrentan al problema de las reservas conocidas, estimadas en 250, 60 y 50 años para el carbón, gas y petróleo, respectivamente, y 50 años para la nuclear de fisión con el actual ciclo de uranio. Además de la disponibilidad de recursos ambas tienen un fuerte rechazo social.

La energía nuclear debe implantar una solución convincente para la gestión de los residuos radiactivos ( $300,000 + 13000$  T/año de combustible irradiado), y conseguir elevar los niveles de seguridad actuales mediante nuevos diseños de reactores. Con respecto al cambio climático, el conocimiento actual es suficientemente concluyente como para iniciar acciones inmediatas para mitigar sus causas. Además, si seguimos

"quemando" combustibles fósiles sin restricciones, las generaciones de los siglos próximos verán a las nuestras como una singularidad en la historia. Habremos hecho desaparecer del planeta una riqueza que le ha costado acumular millones de años.

En este contexto de encrucijada: 1) debemos afrontar el problema energético con todo realismo y 2) La I + D en energía no solo es conveniente, sino estrictamente necesaria en todas las fuentes existentes o potenciales de energía.

## Opciones para el futuro

El abastecimiento energético será, previsiblemente, una combinación de fuentes energéticas, en un escenario que incluye el fin del petróleo barato, la escasez de reservas, y la dependencia en suministro de zonas inestables geopolíticamente. Sin embargo, conviene tener presentes algunos datos:

- 1) El consumo se ha multiplicado por un factor 100 desde la era industrial y crece a un ritmo promedio del orden del 2,3% anual.
- 2) Las desigualdades entre países son alarmantes (por ejemplo Suecia consume 150 veces más electricidad que Tanzania) y es estrictamente necesario que los países en vías de desarrollo tengan una oportunidad energética.
- 3) El consumo energético promedio hoy es de 0,2 GJ/persona/día, equivalente a aproximadamente 2,3 kW/persona, 16 veces más que la energía consumida en la alimentación (3000 Kcal/día), de la que carece casi la tercera parte de los habitantes del planeta. Este es el valor promedio global, en los países desarrollados el promedio es 5 veces mayor.
- 4) La potencia total necesaria es ya enorme, 10 TW, aproximadamente 1,6 veces menos que el total de la energía que genera internamente la tierra (geodésica) y 3 veces más que la energía cinética debida a la influencia solar y lunar (mareas).
- 5) Comparando opciones, a la hora de analizar cuáles pueden ser masivas en el suministro energético procede mencionar que la superficie cultivada del planeta es del orden de 10 millones de km<sup>2</sup>, que se necesitaría de orden del doble de extensión para generar los 10 TW con biomasa o energía eólica en lugares favorecidos por el viento, que con la décima parte se podría conseguir el abastecimiento con el Sol y que con la centésima parte se consigue con plantas térmicas o nucleares. De las cifras se deduce la necesaria diversificación en la generación pero también cuáles son las fuentes potencialmente masivas de energía, antes mencionadas.

En consecuencia será necesario desarrollar tecnologías limpias de combustión, incluyendo la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub>, previsiblemente una "nueva" energía nuclear de fisión, incrementar sustancialmente el papel de las energías renovables, singularmente la solar, en la producción de electricidad, calor y frío, y de los biocarburantes en el sector del transporte, así como promover la implantación del hidrógeno y las tecnologías de

pilas de combustible. A largo plazo la fusión nuclear puede también tener una contribución importante al consumo, particularmente en los países desarrollados, dada su complejidad tecnológica.

## Combustibles fósiles

El carbón es un recurso abundante cuyo papel en el suministro requerirá emplear tecnologías limpias en los procesos de generación.

Están en fase de desarrollo o demostración tecnologías para la combustión eficiente de carbón como el lecho fluidizado (CLFC), que permite el aprovechamiento de combustibles energéticamente pobres. La gasificación del carbón es, en la actualidad, un tema de investigación, desarrollo y demostración, ya que permite incrementar la eficiencia de generación unido a una baja tasa de emisiones. Los desarrollos de turbinas de gas avanzadas permitirán aumentar la eficiencia, pero siguen existiendo problemas técnicos antes de demostrar sus posibilidades de utilización a gran escala. Además, es necesario reducir los costos de inversión, superiores a las plantas convencionales de carbón. Las "curvas de aprendizaje" muestran que las tecnologías anteriores podrían ser competitivas aunque el costo final del kWh dependerá de la disponibilidad de combustibles y de su precio, además de otras variables.

Con respecto al CO<sub>2</sub>, actualmente se captura a escala industrial mediante tecnologías basadas en el empleo de disolventes químicos y físicos, membranas, absorción en zeolitas o materiales sólidos así como por métodos criogénicos. Aunque ya se aplican en algunos procesos industriales, la utilización de estas tecnologías supondría la instalación de sistemas de separación poscombustión con elevados costos de inversión.

La alternativa para disminuir los costos de captura se basa en lograr mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> lo que se puede conseguir mediante la captura en la fase de precombustión o la tecnología de oxidación. La oxidación es una alternativa en la que el carbón se quema en una atmósfera rica en oxígeno, en lugar de en aire, produciendo una corriente de vapor de agua y CO<sub>2</sub> puro sin mezcla de otros gases, por lo que no requiere separación. Para atemperar la llama se reciclan gases de combustión (CO<sub>2</sub>) fríos. Los costos de captura de CO<sub>2</sub> se trasladan a la obtención de oxígeno, técnicamente más sencillo, y a los relacionados con la recirculación de gases. Los obstáculos radican fundamentalmente en conseguir condiciones de combustión adecuadas para asegurar la estabilidad de la llama, y los costos asociados a la producción del oxígeno necesario.

En cualquier caso el principal problema es la repercusión que la utilización de tecnologías limpias de combustión tendrá sobre el costo de la electricidad.

## Energía nuclear de fisión

La energía nuclear no emite gases de efecto invernadero, solo los asociados al proceso de construcción, y se cuenta con recursos

para incrementar las medidas de seguridad y proporcionar soluciones mucho más satisfactorias para la gestión de los residuos radiactivos, principal inquietud social. Se puede también cambiar el ciclo del combustible de forma que pueda devenir una fuente masiva de energía.

En relación con los residuos de baja y media actividad (RBMA), existen métodos de almacenamiento en superficie. Con respecto a los residuos de alta actividad es muy aconsejable recurrir a su almacenamiento temporal (AT), hasta desarrollar una solución tecnológica que disminuya drásticamente las exigencias del almacenamiento definitivo (AD). Las tecnologías complementarias a los emplazamientos se fundamentan en la transmutación por captura neutrónica posterior a la separación de los residuos de larga vida y su eliminación a gran escala. Utilizan aceleradores de partículas en los denominados "Sistemas Asistidos por Acelerador", aplicados en instalaciones nucleares subcríticas, que además de la destrucción de los residuos permitirían recuperar

parte de la energía que almacenan. Aunque las técnicas referidas están en fase de desarrollo, se podrían aplicar en un futuro próximo para reducir drásticamente la toxicidad de los residuos a largo plazo (figura 1).

Las centrales nucleares inmediatas serán resultado de la evolución de las actuales de agua ligera. A más largo plazo, se desarrollarán diseños revolucionarios, la denominada Generación IV, que requiere un I + D intensivo. Estos conceptos de reactor permitirán el uso de la totalidad del combustible, garantizando con ello la sostenibilidad.

La seguridad y la protección son actividades fundamentales para asegurar el funcionamiento de las instalaciones nucleares. Los efectos de la radiación a largo plazo y la exposición a bajas dosis durante largo tiempo son ejemplos de temas de investigación necesarios.

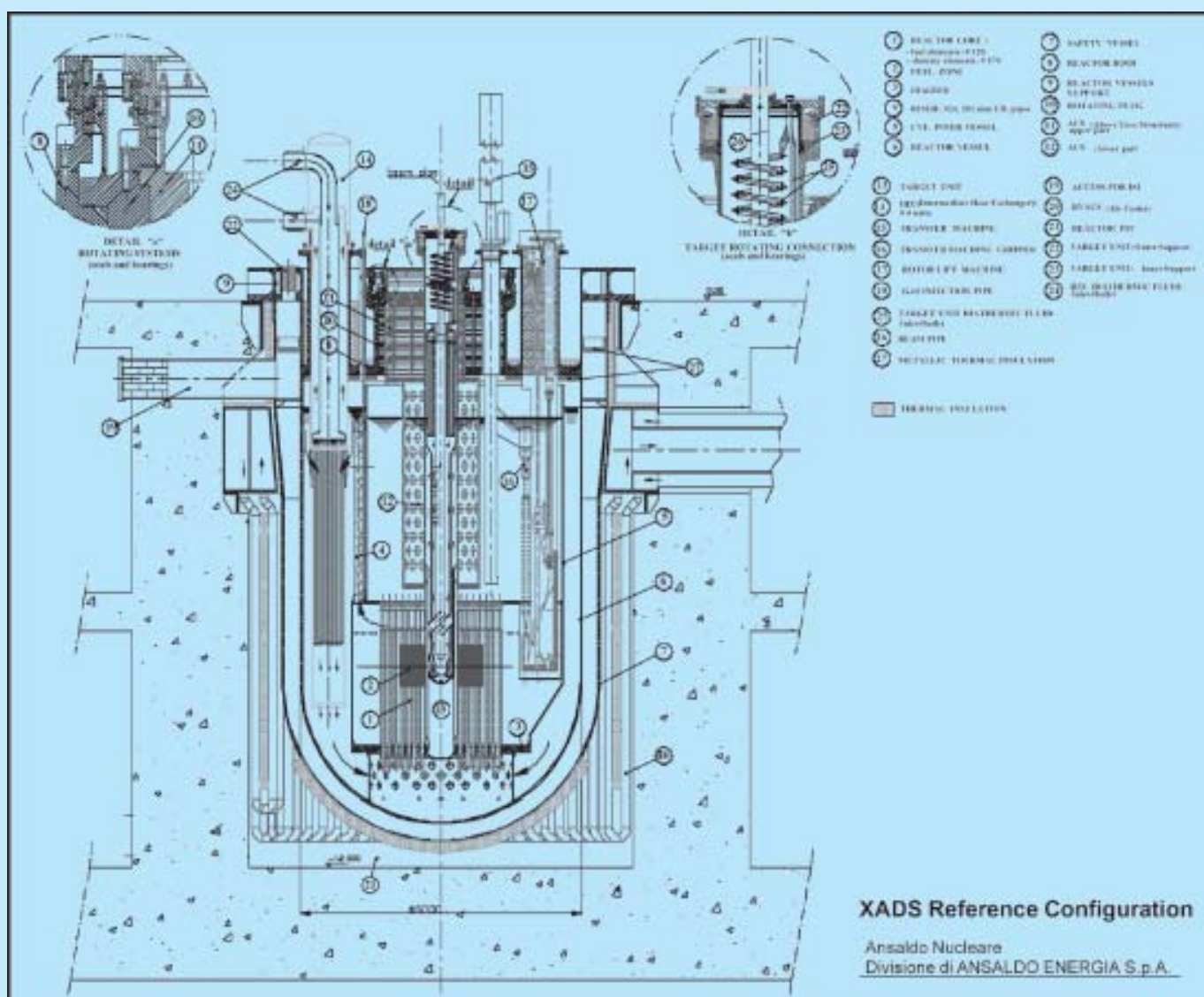


Figura 1. Vista esquemática de un sistema asistido por acelerador.



## Solar Térmica de Concentración

A medio plazo la energía solar por concentración permitirá aprovechar parte de los 100 000 TW que se reciben procedentes del Sol, 10 000 veces más que el consumo. La concentración de la energía solar mediante distintas configuraciones de receptores, espejos y sistemas reflectores, genera temperaturas elevadas que se utilizan para producir trabajo mecánico y electricidad mediante ciclos termodinámicos o se pueden aplicar en reacciones químicas. La utilización de la energía solar de concentración en la generación eléctrica es una tecnología cuya viabilidad está demostrada y cuenta con la capacidad suficiente para ser una fuente masiva con alta eficiencia en los próximos años. Las configuraciones utilizadas para concentrar la radiación solar se basan, principalmente, en espejos colectores cilíndrico-parabólicos o configuraciones de tipo torre. Estas centrales solares tienen la posibilidad de generar electricidad mediante producción distribuida, instalaciones en la escala de los kW, o como sistemas centralizados con varios cientos de MW de potencia. Otra característica importante es su capacidad para poder suministrar electricidad bajo demanda, utilizando almacenamiento térmico o mediante sistemas híbridos en los que se utiliza en combinación con una caldera convencional alimentada por combustibles fósiles (figura 2).

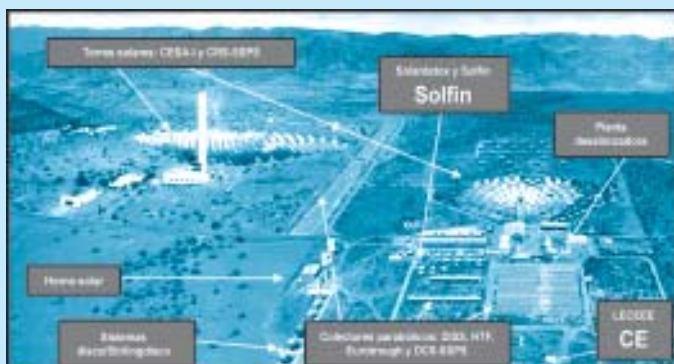


Figura 2. Vista aérea de la Plataforma Solar de Almería. En ella se observan colectores parabólicos y torres solares, además de otras instalaciones.

La viabilidad de esta tecnología requiere construir instalaciones a gran escala que contribuyan al despegue del sector industrial asociado. El principal reto es la disminución de costos, situados actualmente entre 15 y 20 céntimos de euro por kWh. Los estudios al respecto atribuyen la mitad de la reducción necesaria a la construcción de plantas de mayor tamaño y capacidad de producción. La otra mitad se conseguiría mediante desarrollos que utilicen fluidos más eficaces, aumenten la eficiencia de los sistemas de concentración incorporando nuevos materiales reflectores y consigan estructuras de menor peso, diseños más sencillos y mejores sistemas para el accionamiento, seguimiento y control de los espejos y heliostatos.

## Energía nuclear de fusión

La fusión sería una opción energética basada en recursos prácticamente inagotables con limitada incidencia sobre el medio

ambiente. Sin embargo, se materializaría en un horizonte temporal más alejado que las anteriores opciones de generación masiva, ya que aún requiere importantes desarrollos científicos y técnicos.

Los experimentos realizados desde la década del 60 tratan de reproducir en el laboratorio las condiciones de temperatura y densidad necesarias para que se desarrollen las reacciones de fusión y produzcan más energía de la que se consume en conseguir las condiciones requeridas. Sin embargo, a pesar de que ha habido progresos importantes en los últimos años, es necesario aumentar el conocimiento sobre la física de la fusión, como son la estabilidad del plasma y algunos aspectos tecnológicos de esta. El año pasado hubo una decisión importante, la construcción del ITER, cuyo objetivo es demostrar la viabilidad científica de la fusión mediante su operación en estado estacionario, así como ensayar materiales en condiciones de alto flujo neutrónico, 10 MW/m<sup>2</sup>. Se ha tomado el acuerdo de construirlo en Cadarache, Francia, con un costo de 4500 M€ y una duración de proyecto de aproximadamente 10 años (figura 3).

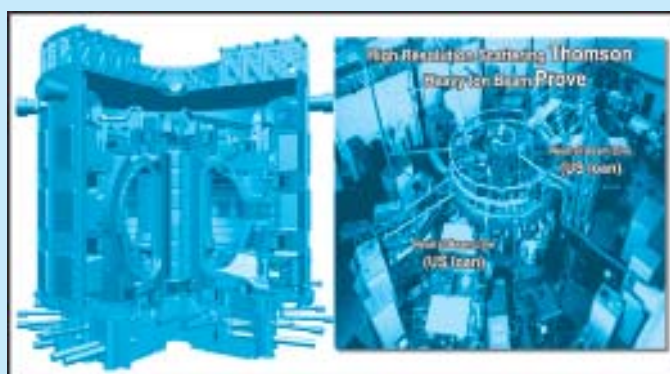


Figura 3. Vistas esquemáticas del ITER y del stellarator TJ-II del CIEMAT.

La fusión se dibuja como una fuente de energía capaz de contribuir masivamente a cubrir la demanda energética. Sin embargo, el camino para conseguir una central de fusión aparece en el horizonte de los 50 años.

## Otras energías renovables

El mercado eléctrico presenta un escenario orientado hacia la diversificación energética, con un aumento significativo en la utilización de las energías renovables. Recordemos el papel relevante que tienen la utilización de sistemas descentralizados, flexibles y adaptables a la demanda, facilitando la generación cercana a los puntos de consumo y evitando las pérdidas por transporte y distribución.

La eólica es la energía renovable más introducida en el mercado con una capacidad de 57 837 MW en todo el mundo y una tasa decrecimiento medio del 28,4% durante los últimos diez años. A pesar de la ausencia de riesgos en este tipo de energía las instalaciones eólicas originan un deterioro paisajístico y una erosión del suelo, junto con una degradación ambiental asociada

a la generación de ruido y alteración del hábitat natural de las especies salvajes. Estos hechos han ocasionado que en los últimos años se esté produciendo una cierta oposición social a la misma.

La conversión directa de la luz solar en electricidad mediante materiales semiconductores es una tecnología ampliamente utilizada para aplicaciones en sistemas aislados de la red o en dispositivos móviles, y representa una posible opción para el suministro a gran escala. Los módulos fotovoltaicos actuales se basan en utilizar como material el silicio mono y policristalino, lo que requiere de tecnologías de fabricación complejas, intensivas en consumo de energía y de elevado costo. Aunque se ha conseguido una reducción importante en precio, la implantación de la energía solar pasa por buscar soluciones innovadoras utilizando nuevos materiales, como silicio amorfo o seleniuro de cobre indio. Se perfila una tendencia hacia el desarrollo de células de lámina delgada con nuevos materiales innovadores. Su utilización y el desarrollo de procesos de fabricación más rápidos, contribuirán a la difusión de la energía fotovoltaica.

La biomasa es una fuente de energía que puede jugar un papel importante en la generación térmica y en la producción de biocombustibles, biodiesel o bioetanol, para el transporte. Su utilización a amplia escala iría unida a la logística de recogida, la mejora de las técnicas utilizadas en la caracterización de los distintos tipos de biomasa y el pretratamiento, recolección, molienda y densificación, así como a la optimización de las tecnologías de conversión térmica o bioquímica para los biocombustibles. Supondría además un impulso para el desarrollo de cultivos energéticos seleccionando los productos más adecuados en cada zona (figura 4).



Figura 4. Planta piloto de combustión con lecho fluidizado burbujeante de 1 MW-CEDER (Soria).

## Hidrógeno y pilas de combustible

En paralelo con las tecnologías anteriores, la utilización del hidrógeno como combustible ecológico en motores de

combustión, turbinas y pilas de combustible se presenta como una tecnología con gran potencial. Sin embargo existen numerosos problemas tecnológicos a resolver antes que el hidrógeno se pueda considerar un vector energético competitivo.

La producción de hidrógeno requiere contar con una materia prima que le contenga, desarrollar procesos y tecnologías de extracción adecuadas y una fuente de energía primaria. La materia prima pueden ser los combustibles fósiles, gas, carbón y derivados del petróleo, o recursos renovables como el agua o la biomasa. Las tecnologías de producción actuales se basan en la electrólisis y el reformado de gas natural. La energía necesaria para estos procesos se obtiene mediante la electricidad producida por fuentes convencionales de generación, energías renovables o energía nuclear. Otras tecnologías, actualmente en fase de desarrollo, utilizan el calor de alta temperatura de origen solar o nuclear para disociar el agua en hidrógeno y oxígeno, mediante procesos termoquímicos.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que, en presencia de un catalizador, transforman la energía química de un combustible (generalmente  $H_2$ ) en electricidad y agua, con un elevado rendimiento, sin recurrir a componentes móviles y, prácticamente sin emisión de contaminantes. Se proponen para la generación de energía tanto en aplicaciones portátiles como estacionarias y, fundamentalmente, podrían reemplazar a los motores de combustión interna. En la actualidad se distinguen, en función del tipo de electrolito utilizado, varias tecnologías o familias de pilas de combustible adaptadas a diferentes sectores de aplicación, pero cuya introducción comercial requiere, aún, la superación de importantes desafíos tecnológicos (figura 5).

El hidrógeno, en combinación con las pilas de combustible, se



Figura 5. Primer proyecto español para la conservación de la energía solar. Generación y consumo de hidrógeno en pila de combustible.

puede utilizar en aplicaciones estacionarias para producir electricidad y, en el transporte como una solución ideal, ya que tiene el doble de eficiencia energética que los motores de combustión interna y produce solo emisiones de vapor de agua. Sin embargo, su explotación a gran escala requiere numerosos



avances tecnológicos orientados a resolver problemas relacionados con su producción (limpia), almacenamiento, distribución y uso final. A su vez, las pilas de combustible necesitan desarrollos que permitan su fabricación en serie y mejoras en todos sus componentes.

La transición desde la situación actual hasta la economía del hidrógeno implica, además, el desarrollo de factores de carácter transversal, orientados a garantizar la aceptación social y los mercados de consumo, lo que introduce nuevas incertidumbres sobre el cómo, cuándo y con qué intensidad se darán los cambios esperados.

## La eficiencia energética

Las medidas relacionadas con la eficiencia buscan conseguir un aumento de la eficiencia en los procesos de generación para producir conjuntamente electricidad, calefacción y frío (poligeneración) junto con la reducción de los consumos en el transporte, la agricultura, la construcción, etc. El incremento de la eficiencia energética puede llegar a suponer, dependiendo de los países, un porcentaje muy significativo del actual consumo.

## El programa del CIEMAT

El CIEMAT es el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España. Sus objetivos principales son la promoción de I+D en energía y en medioambiente y la utilización de las tecnologías derivadas en beneficio social. El CIEMAT también promueve la investigación básica en disciplinas de "Gran Ciencia" que constituyan una plataforma de conocimiento y tecnología de aplicación múltiple, y desarrolla proyectos precompetitivos y competitivos en un marco europeo o mundial, en colaboración con universidades e industrias españolas y con países de Iberoamérica y del Mediterráneo.

En el dominio de la energía el CIEMAT cubre prácticamente todas las fuentes existentes o potenciales. Citaremos como ejemplos, únicos en Europa, la plataforma de combustión limpia de carbón en el Bierzo (5 MW); los proyectos de generación eléctrica termosolar masiva, cuyos desarrollos previos se llevan a cabo en la plataforma solar de Almería (PSA); el "stellarator" para estudiar aspectos científicos y tecnológicos de la fusión o las actividades destinadas a la eliminación de residuos nucleares de larga vida; una instalación de 1 MW, para apoyo de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA).

Merecen citarse también las actividades en biomasa, que tienen lugar en el CEDER (Soria), las de energía fotovoltaica, generación y utilización de hidrógeno y las destinadas al ahorro energético mediante la utilización de arquitectura bioclimática. El CIEMAT fue origen, en España, tanto del desarrollo de la energía nuclear como del de la eólica. En esta última tiene aún actividades múltiples, en particular las relativas a pequeños aerogeneradores. Lleva a cabo programas medioambientales, tanto en el dominio

de la protección radiológica como en la prevención y solución de problemas de contaminación convencional. No haré referencia a sus actividades en tecnología e investigación básica, porque no se incluyen directamente en el tema del presente artículo (figura 6).

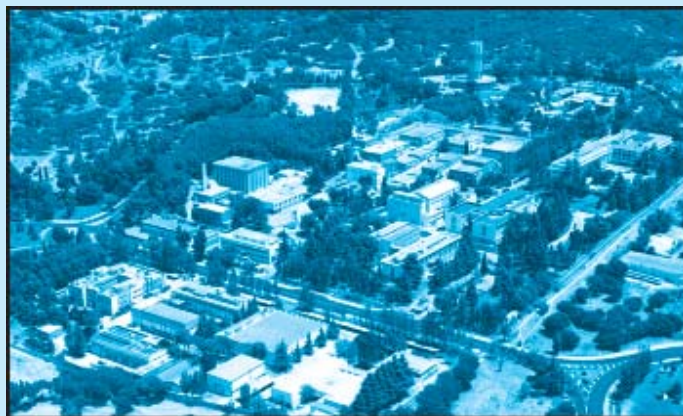


Figura 6. Vista aérea de la sede del CIEMAT en la Moncloa.

## Conclusiones

El mundo está en una encrucijada energética. Las actuales fuentes masivas de energía tienen un notable rechazo social y las fuentes alternativas no han alcanzado aún, en general, el nivel de competitividad necesario. Además, el crecimiento del consumo se prevé considerable en las próximas décadas, particularmente debido a los países en vías de desarrollo. En este contexto es indispensable promover la I+D en energía, con especial énfasis en las potenciales fuentes masivas, sabiendo que, previsiblemente, el futuro abastecimiento energético estará más diversificado que el actual. El CIEMAT lleva a cabo importantes proyectos en prácticamente todos los campos de energía y medioambiente en un contexto europeo o mundial y en colaboración, principalmente, con países de Iberoamérica y el Mediterráneo. En nuestra opinión es su marco natural de colaboración y como diría Don Quijote: "Buen natural tienes Sancho, sin el cual no hay ciencia que valga".

## Agradecimientos

El autor desea agradecer a Fidel Castro Díaz-Balart (Asesor del Consejo de Estado) y a Angelina Díaz (Presidenta de la AENTA) por sus constantes pruebas de amabilidad y afecto, a Manuel Fernández (Director de CUBAENERGÍA) por su invitación a escribir el presente artículo para la revista NUCLEUS. Deseo también agradecer a Juan Antonio Cabrera su ayuda en la preparación del artículo, a Milagros Couchoud por su lectura y correcciones al texto y al personal de la editorial CIEMAT por la composición del mismo. ♦