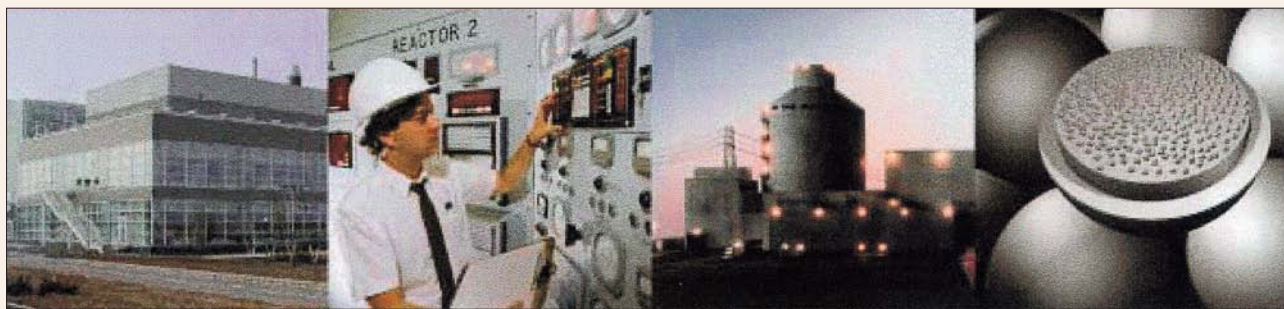




# EL FUTURO DE LA ENERGÍA DE LA FISIÓN: ¿EVOLUCIÓN O REVOLUCIÓN? \*

En este momento hay en el mundo unas 440 centrales nucleares en funcionamiento, con una capacidad total instalada de unos 360 GW. A lo largo de un año producirán más de 2.500 TWh de energía eléctrica, evitando la producción de más de  $10^9$  toneladas de  $\text{CO}_2$  a partir de combustibles fósiles. Además, la energía nuclear contribuye de forma significativa a la seguridad del suministro energético; los Gobiernos están cada vez más preocupados en ese aspecto a la luz de la experiencia en California, sin olvidar la reciente volatilidad de los precios del crudo y del gas y la creciente dependencia de las importaciones energéticas.

La producción global de las centrales nucleares ha mejorado gradualmente con el tiempo, habiéndose llegado en 2002 a un factor medio de disponibilidad cercano al 84%. Tal factor fue 74% en 1992, de forma que las mejoras en la operación han incrementado la producción anual en más del 12%, ó 300 TWh. Sin embargo, muchas de esas centrales son ya relativamente antiguas y quedarán desmanteladas para finales de 2020. Si van a ser reemplazadas por centrales nucleares nuevas, éstas tendrán que cumplir nuevos requisitos de seguridad, fiabilidad, eficiencia, coste y sostenibilidad.

Aunque el mercado de nuevas centrales nucleares ha estado estan-

cado en Europa Occidental y en EE.UU. durante los últimos 20 años, los suministradores de reactores han estado desarrollando los llamados *conceptos evolucionados*, que buscan aplicar a la tecnología existente simplificaciones que mejoran el comportamiento en lo relativo a seguridad, mientras, a la vez, reducen los costes de construcción y funcionamiento. Elaborados análisis de costo de tales centrales indican que pueden competir económicamente con centrales de gas de ciclo combinado, sueltas condiciones adecuadas de la inversión.

Sin embargo, la oportunidad de la introducción de diseños evolucionados puede verse limitada por los nuevos diseños revolucionarios que se están gestando en paralelo. Tales diseños buscan salirse del marco de la tecnología de los reactores de hoy y aspiran a demostrar importantes mejoras de funcionamiento respecto a los diseños evolucionados. El tema de los sistemas llamados revolucionarios ha sido impulsado recientemente por la *Iniciativa Generación IV* (Gen IV), encabezada por los EE.UU. Gen IV ha identificado seis sistemas revolucionarios de reactor y ciclo asociado de combustible, que constituirán el foco de una colaboración internacional para su investigación. Se confía en que uno o más de tales sistemas lleguen a ser el modelo de una

nueva generación de reactores que lleven a la energía de la fisión a contribuir al desarrollo sostenible a lo largo del siglo XXI.

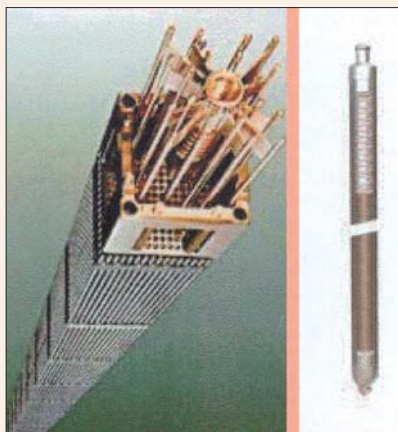
Los diseñadores de los sistemas de Gen IV contemplan un futuro en el que los reactores nucleares contribuyan, al lado de las fuentes energéticas fósiles y renovables, a constituir una solución integrada para la producción de energía, que podría incluir el transporte mediante la producción de hidrógeno. La energía nuclear necesita eliminar el estigma actual que a menudo lleva a los políticos a no reconocer su contribución positiva a la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$ . El desarrollo de los sistemas evolucionados y revolucionarios es, se confía, el primer paso hacia ese objetivo.

## LA FISIÓN

Cuando se produce la fisión de un núcleo fisible (tal como  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  o  $^{241}\text{Pu}$ ) tras interacción con un neutrón, se libera una energía de unos 200 MeV; su mayor parte corresponde a la energía cinética de los fragmentos de la fisión, que se manifiesta como calor. Cada fisión produce además en promedio dos o tres neutrones, capaces de propagar la reacción en cadena. En un reactor grande, un pequeño porcentaje de tales neutrones de fisión escapan del núcleo central del reactor. El resto acaba desapareciendo en reacciones de

\* Reproducido de un documento del *Institute of Physics*, Londres, 2004, del que son autores *Richard Mayson*, *Andrew Worral* y *Kevin Hesketh*.

*Figura 1. Las dimensiones globales de la central Sizewell B (tipo PWR) en el primer plano contrastan con las del AP 1000 en el fondo, mucho menores para una producción eléctrica sólo ligeramente inferior. Tomando sólo como referencia el volumen de hormigón necesario, el AP 1000 promete ser mucho más barato de construir.*



absorción, en las que un neutrón es capturado inútilmente en un núcleo o bien provoca otra fisión. En funcionamiento estacionario sólo un neutrón de los producidos en una fisión provoca una nueva fisión en la siguiente generación, y el reactor tiene un *factor de multiplicación* neutrónica igual a 1.

Los neutrones que surgen de la fisión nacen con una energía promedio del orden de 1 MeV. Se han diseñado reactores rápidos para utilizar directamente tales neutrones, mientras que los reactores térmicos frenan (moderan) a los neutrones de fisión por choques elásticos con núcleos ligeros. Los reactores térmicos son en muchos aspectos más sencillos tecnológicamente que los rápidos, razón por la que estos últimos están lejos todavía de constituir una parte significativa del conjunto de reactores comerciales.

Aproximadamente el 90% de los reactores que hoy funcionan emplean agua ordinaria o agua pesada para moderar los neutrones. La selección del moderador determina en gran parte el tamaño del núcleo del reactor. Los núcleos moderados por agua ordinaria son siempre muy compactos, lo que reduce los costos de construcción. Además, las excelentes características del agua relativas a la transferencia de calor hacen que pueda jugar simultáneamente los papeles de moderador y refrigerante. Esas características explican en parte por qué los reactores de agua ordinaria (LWR) representan hoy más del 80% del total mundial. Los demás están repartidos de forma más o menos igualada entre los moderados por agua pesada (HWR) y los moderados por grafito, incluyendo éstos los de tipo *Magnox* y AGR en el Reino Unido

y la RBMK de diseño ruso. Esos reactores actuales y los diseños de reactores futuros actualmente en desarrollo se enfrentan a muchos retos tecnológicos.

## RETOS TECNOLÓGICOS

Aun con diferencias en los detalles, los retos tecnológicos a que se enfrentan el diseño, desarrollo y operación de reactores nucleares son en gran parte comunes a los diversos tipos de reactor. El primero corresponde a los diseñadores del núcleo: establecer un esquema satisfactorio de carga del combustible. El problema básico es asegurar que la distribución de material fisible dé lugar a una distribución uniforme de potencia de fisión. A la vez deben ser aceptables otras características importantes del núcleo, como eficacia de las barras de control y coeficientes de realimentación; la operación segura requiere que la reacción en el núcleo pueda ser detenida por las barras de control y que exista una situación de realimentación negativa para evitar reacciones fuera de control.

El siguiente paso en el diseño es asegurar que el calor producido en el núcleo puede transferirse adecuadamente a la turbina de vapor. La potencia térmica de un reactor nuclear de hoy puede alcanzar 4 GW y tiene gran influencia en el diseño del combustible y del núcleo. La energía de la fisión aparece principalmente como calor en el combustible, para pasar luego al refrigerante a través de la vaina que cubre al material combustible. La gran superficie necesaria para esa transferencia es la que define el diseño de los elementos combusti-

bles; la solución establecida es agrupar varias barras de combustible de pequeño diámetro, como muestra la figura 1. La demostración de su comportamiento termohidráulico satisfactorio requiere el análisis hidráulico de un fluido turbulento, que en un reactor de agua puede implicar también dos fases.

El comportamiento termomecánico del combustible está muy relacionado con el termohidráulico. Una barra de combustible de un reactor nuclear de hoy comprende una columna de partículas cerámicas, la vaina, el hueco partícula/vaina (habitualmente llenado con helio), un espacio superior para albergar los productos de fisión gaseosos liberados y piezas de extremos superior e inferior que sellan el tubo (Figura 1). A primera vista, ello parece un sistema muy sencillo. Sin embargo, dentro de la barra entran en juego un sorprendente número de procesos físicos como conducción de calor, expansión térmica, tensiones internas y cambios dimensionales en la pastilla de combustible (debidos a su reestructuración y el hinchamiento por los productos de la fisión), tensiones en la vaina, fluencia lenta y corrosión en la misma, etc., por citar algunos.

## EVOLUCIÓN

Datan de los años 50 los actuales reactores de agua a presión (PWR), de agua en ebullición (BWR) y los HWR de tipo *CANDU*. Con muchos miles de años-reactor de funcionamiento acumulado, han demostrado que son fiables y seguros. Están diseñados para detener automáticamente la reacción en cadena en caso de presentarse situaciones anormales. El único y más importante requisito de seguridad es ser capaz de garantizar la eliminación fiable del calor nuclear residual, que perdura tras la parada del reactor (ver **Calor Residual**). Todos los PWR, BWR y *CANDU* tienen circuitos a presión compactos, con inercia térmica relativamente baja, para la transmisión del calor primario. Ello significa que la respuesta transitoria del conjunto acoplado reactor/sistema térmico puede ser muy rápida, lo que impone severas condiciones a los cir-

cuitos de control y de protección y a los sistemas de seguridad que gobiernan. Ello ha llevado históricamente en el diseño a incorporar múltiples redundancias en sensores, válvulas, bombas, acumuladores, fuentes de alimentación de reserva, etc. La necesidad de instalar y mantener en el nivel de calidad nuclear tales sistemas hace aumentar los costes de construcción y mantenimiento y representa una penalización económica. Adicionalmente, tales requisitos de seguridad se han acrecentado en severidad a lo largo de los años, dando lugar a sistemas cada vez más complicados. Esto ha llevado a que el costo de un reactor dado no se ha reducido con el tiempo, al contrario que la mayor parte de las cosas que se compran (por ejemplo, un aparato de vídeo). Además de ese aspecto de costo, la adición de nuevos niveles de complejidad puede a veces ser contraproducente al abrir la posibilidad de desarrollo de secuencias de fallo más complejas. Se necesita un cambio de filosofía; los diseños actualmente en desarrollo para reactores LWR y HWR evolucionados hacen máximo uso de sistemas de seguridad pasivos que evitan varios niveles de complejidad.

Un ejemplo es el reactor AP1000, *Advanced Passive 1000* de **Westinghouse**; se trata de un PWR simplificado con sistemas pasivos de seguridad. Los sistemas pasivos usan sólo fuerzas naturales tales como la gravedad, la circulación natural o gas comprimido; principios físicos simples en que nos apoyamos a diario. No hay aquí, para los sistemas de seguridad, ni bombas, ni soplantes, ni grupos diesel, ni enfriadores ni maquinaria rotativa; ello elimina la necesidad de fuentes de energía eléctrica del mismo grado de seguridad. Unas pocas válvulas sencillas permiten la operación de los sistemas pasivos cuando se activan automáticamente. En la mayoría de los casos, las válvulas son del tipo *fail safe*: requieren energía para mantenerse en la posición normal de cerrada. La pérdida de alimentación causa su apertura para la



*Figura 2. El elemento combustible de un HTR es una microesfera de 1 mm de diámetro. Su núcleo central conteniendo el combustible nuclear está encapsulado por dos capas: una de carbono pirolítico y otra de carburo de silicio. Esas capas retienen los productos de fisión radiactivos dentro de la microesfera, a la vez que protegen al combustible nuclear del contacto con el gas refrigerante. Decenas de miles de tales microesferas se incorporan en una matriz de grafito, que actúa de moderador.*

función de seguridad; en todos los casos emplean energía almacenada en resortes, gas comprimido o baterías. El AP1000 está basado en el reactor PWR de tres lazos de **Westinghouse**, muchos de ellos hoy día en servicio. Lo que se busca es aprovechar en lo posible la amplia experiencia acumulada en diseño y operación, usando sistemas pasivos de seguridad en lo posible.

Este camino permite al AP 1000 eliminar 50% de las válvulas, 36% de las bombas y más del 80% de las tuberías y cables en comparación con una central parecida de la generación anterior; además, el volumen de edificios que requiere cualificación sísmica se ha reducido en un 56%. Ello resulta en una menor envergadura total del AP 1000 como se observa en la figura 2, además de conseguirse una mejora en las características de seguridad; todo ello lleva directamente a ahorros im-

portantes en el costo de construcción. Las estimaciones del costo de construir y operar un AP 1000 en el Reino Unido, tras tener en cuenta los aspectos de costos específicos del país, sitúan el coste total de generación entre 24 £/MWh para la primera central y 20 £/MWh para las siguientes de una serie; esto es competitivo con la electricidad producida por centrales de gas de ciclo combinado.

## REVOLUCIÓN

En paralelo con el desarrollo de reactores evolucionados de agua, hay avances en el campo de los reactores de gas de alta temperatura (HTR, *High Temperature Gas Reactor*). Hay diseños muy avanzados de prototipos del *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR) y progresos también en el *Gas Turbine Modular Helium Reactor* (GT-MHR). Los HTR se caracterizan por sus núcleos totalmente cerámicos y la ausencia de componentes metálicos en el núcleo activo permite temperaturas de funcionamiento ex-

### Calor residual

*Todos los reactores nucleares se diseñan de forma que las barras de control puedan interrumpir la reacción de fisión en cadena en uno o dos segundos. Pero esto no significa que la generación de calor caiga a cero inmediatamente. Se mantiene la producción de calor residual debida a una combinación de emisión de energía por parte de los productos de la fisión y de energía de las fisiones producidas por neutrones diferidos. La combinación de neutrones diferidos y desintegración radiactiva hace que el calor residual inmediatamente tras la parada viene a ser 7% de la potencia inicial del núcleo, lo que puede ascender a 300 MW para un reactor grande. Ese calor residual disminuye a lo largo del tiempo, pero puede aún mantenerse varios días en el nivel de 1%; asegurar que ese calor se elimina sin problemas es uno de los retos principales de un reactor nuclear.*



traordinariamente altas, lo que lleva a una elevada eficiencia térmica. Además, la naturaleza refractaria del combustible posibilita la seguridad pasiva; la máxima temperatura en el núcleo tras la secuencia más grave de fallos (que supone ausencia de eliminación activa del calor residual) es inferior a la temperatura de degradación del combustible cerámico.

El combustible tanto para el PBMR como para el GT-MHR se basa en la tecnología de partículas encapsuladas. Se trata de esferas de 1 mm de diámetro en cuyo centro hay un núcleo que contiene el material combustible (dióxido de uranio o de uranio/plutonio). Ese núcleo está recubierto por capas de carbono pirrolítico y de carburo de silicio que retienen los productos de fisión gaseosos, de forma que cada microesfera es en realidad un recipiente sellado. En el PBMR, las microesferas de combustible se incorporan a una matriz de grafito, en forma de esferas de 6 cm de diámetro que constituyen el lecho de esferas del reactor (Fig. 3). En el GT-MHR, la matriz de grafito adopta la forma de bloques exagonales de combustible, que se apilan en forma de núcleo de reactor más convencional.

Los HTR no son un concepto nuevo; se desarrollaron ampliamente entre los años 60 y los 80 y usan helio como refrigerante. Se perdió interés en ellos en los 80 porque se les juzgó antieconómicos comparados con los LWR. Ahora hay una perspectiva diferente porque el circuito secundario de vapor empleado para accionar una turbina de vapor se ve sustituido por una turbina de gas, funcionando en el

ciclo llamado de **Brayton**. A la vez que acciona el generador eléctrico, el helio acciona compresores de alta y baja presión que restauran de forma continua la presión del gas. Los ciclos directos con turbinas de gas alcanzan una mayor eficacia térmica y son más sencillos y baratos de construir que los diseños que les precedieron.

Apadrinada por los EE.UU., la Iniciativa Gen IV es una colaboración internacional que prepara el futuro a largo plazo de la energía de fisión. Sus objetivos son desarrollar nuevos sistemas (sostenibles) de reactor y ciclo de combustible con mejoras en su economía, seguridad, fiabilidad y resistencia anti-proliferación, con la vista puesta en su despegue comercial para 2030.

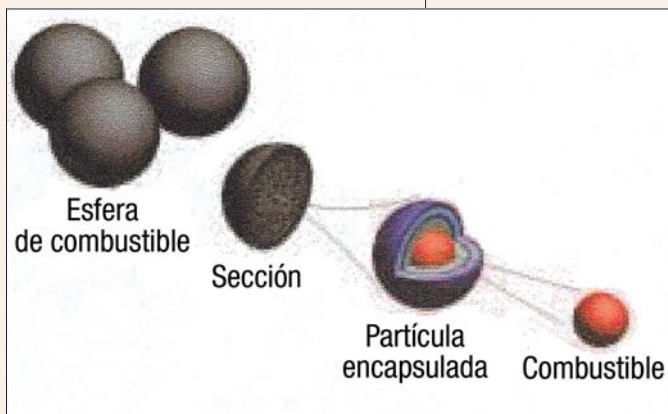
Quizá el objetivo clave de los sistemas de Gen IV es la sostenibilidad, que los reactores nucleares actuales no satisfacen plenamente. Un aspecto de la sostenibilidad es poder obtener el máximo de energía eléctrica de cada kilo de mineral de uranio extraído. La mayoría de los reactores de hoy operan bajo el concepto denominado ciclo abierto, en el que el combustible usado se almacena junto al reactor para su posterior acondicionamiento y almacenamiento geológico en el momento adecuado. Con ese tipo de ciclo, sólo se aprovecha del orden de 1% del potencial energético del uranio, lo que significa un método relativamente ineficaz de usar los limitados recursos del mismo. En algunos de los reactores actuales el combustible gastado se reprocesa, y se recicla plutonio. Aunque esto representa un pequeño avance hacia el objetivo de rentabilidad, los aspectos

prácticos de los reactores actuales limitan el número de veces que el plutonio puede reciclarse antes de que su composición isotópica se degrade de forma que sea ya inutilizable.

Es más fácil conseguir un reciclado eficiente del material en un reactor de espectro rápido, una de las razones por las que cuatro de los seis sistemas escogidos para el desarrollo Gen IV son reactores rápidos. Son el reactor rápido refrigerado por gas (GCFR), el refrigerado por plomo (LFR), el refrigerado por sodio (SFR) y el refrigerado por agua supercrítica (SCWR). Todos ellos usarían una tecnología avanzada de reprocesamiento para establecer un ciclo reproductivo; tras la carga inicial de combustible, se genera a partir del uranio-238 fértil sólo el plutonio suficiente para conseguir el auto-mantenimiento del combustible. El objetivo de una tecnología avanzada de reprocesamiento es reforzar la resistencia anti-proliferación manteniendo el combustible en situación demasiado caliente para manipularlo, mediante el uso de barreras autoprotectoras tales como áreas bajo radiación.

Gen IV tiene también en su lista el reactor de muy alta temperatura (VHTR), que apunta a superar la tecnología del PBMR y del GT-MHR para cumplir los objetivos de Gen IV. A las temperaturas de salida del gas previstas (más de 900 °C), pueden conseguirse eficiencias térmicas muy elevadas, con la opción adicional de usar el gas como fuente de calor para la producción de hidrógeno. El VHTR puede ser además considerado como un precursor del GFR.

El programa de Gen IV identifica los vacíos tecnológicos para cada uno de los sistemas preselecciona-



*Figura 3. El elemento combustible de un HTR es una microesfera de 1 mm de diámetro. Su núcleo central conteniendo el combustible nuclear está encapsulado por dos capas, una de carbono pirrolítico y otra de carburo de silicio. Esas capas retienen los productos de fisión radiactivos dentro de la microesfera, a la vez que protegen al combustible nuclear del contacto con el gas refrigerante. Decenas de miles de tales microesferas se incorporan en una matriz de grafito, que actúa de moderador.*

dos. Todos ellos los tienen, e importantes, como puede esperarse en tecnologías que suponen cambios revolucionarios respecto a la existente. Muchos de esos vacíos son comunes a más de un sistema, como tecnología del combustible, desarrollo de los sistemas de Ingeniería, tecnología del ciclo del combustible y tecnología de los materiales. Los programas de desarrollo y pruebas de reactores se extienden normalmente en largas escalas temporales y son de ejecución costosa, lo cual es una de las principales razones por las que un programa tan ambicioso sólo puede llevarse a cabo bajo colaboración internacional. Se confía en que Gen IV produzca el conocimiento tecnológico necesario para eliminar esos vacíos y conseguir que uno o más de los sistemas se desarrollen hasta su disponibilidad comercial dentro de los próximos 20 años.

### TRANSMUTACIÓN DE ACTÍNIDOS

Los residuos de alta actividad de los reactores de fisión están constituidos por una combinación de elementos radiactivos ligeros (principalmente productos de fisión y de activación) y núcleos pesados (actínidos). Los productos de fisión tienen vida relativamente corta, y su contribución a la actividad total cae bruscamente después de 500 años. Sin embargo, los actínidos tienen vida mucho más larga y, en particular, el neptunio, el americio y el curio mantienen elevados niveles de actividad durante decenas de miles de años. Si se pudiera de alguna forma destruir los actínidos, el perfil temporal de la actividad de los residuos de alto nivel sería mucho más favorable. Este es el motivo del extenso esfuerzo internacional sobre transmutación de actínidos.

El objetivo sería separar del combustible gastado el neptunio, el americio y posiblemente el curio y reinsertarlos en el campo neutrónico de un sistema de fisión. El neptunio se destruye más eficientemente incorporándolo como parte integral del combustible de un reactor de espectro rápido (quemado homogéneo de actínidos), mientras que para el americio el método más eficaz es fabricar barras

de combustible heterogéneas conteniendo un compuesto adecuado como dióxido o nitrato de americio. Como para el neptunio, el quemado del americio es más eficaz cargando esas barras heterogéneas en un reactor de espectro rápido.

Se discute si la transmutación de actínidos se consigue más eficazmente en reactores subcríticos con un acelerador (ADS), en los que se mantiene un flujo neutrónico estacionario mediante neutrones de espalación producidos por un acelerador de protones de 1 GeV. Sea crítico o subcrítico el reactor usado para ese propósito, los beneficios de reducir la actividad de los residuos de alto nivel deben considerarse a la luz de la complejidad adicional tanto del reactor como de su ciclo de combustible. Tales sistemas presentan muchos retos tecnológicos y actualmente están muy lejos de su disponibilidad comercial.

### GRAVEDAD FOSILIZADA

Los reactores nucleares deben competir con otras fuentes de energía y la industria nuclear defiende para el futuro un suministro eléctrico con un equilibrio entre las diversas fuentes. Es instructivo considerar cuál es en último término la fuente de la energía en los combustibles fósiles y en los renovables. Naturalmente es la energía solar, que formó el combustible fósil y es la fuente de todas las formas de energía renovable. Puesto que la energía solar proviene de la fusión nuclear en el núcleo del sol, resulta irónico que mientras la fusión nuclear controlada se desarrolla muy lentamente, la mayor parte de la producción de energía, histórica y actual, deriva de ella.

¿Y la energía de fisión? Los núcleos pesados que empleamos en los reactores nucleares se crearon mediante capturas neutrónicas en explosiones de supernovas. El proceso físico que motiva el colapso del núcleo de una supernova es la gravedad. Por ello la energía de la fisión puede remontarse hasta la gravedad; los núcleos fisionables son efectivamente depósitos fosilizados de energía potencial gravitatoria de las grandes es-

trellas que acabaron su ciclo hace mucho tiempo con una explosión.

### EL SIGUIENTE PASO

Hay quienes se oponen a la energía de fisión con el argumento de que supone liberar una fuerza antinatural.

Dadas las amenazas ambientales a que se enfrenta la Tierra, estamos obligados a no descartar una tecnología con la capacidad demostrada de producir energía de forma fiable y segura sin emisiones de gases de efecto invernadero. En el Reino Unido, si queremos evitar el aumento de tales emisiones, tenemos que empezar urgentemente a planificar las nuevas centrales nucleares que reemplazarán a las actuales cuando éstas vayan desmantelándose. Sin embargo, el clima social y político actual no conduce a tal objetivo.

Algunos campos clave que deben iniciarse son: la exploración de mecanismos para articular la inversión privada; la necesidad de simplificar el proceso de licenciamiento y de autorizaciones; y un mejor conocimiento por el público de los beneficios y riesgos de la energía nuclear. Los científicos y los ingenieros tienen un papel importante en los futuros desarrollos de nuevos sistemas de reactores; además de esto, es muy importante su participación en mejorar la educación del público para permitir un debate informado sobre este tema tan decisivamente importante.

Como conclusión, la respuesta a la pregunta del título de este trabajo es que **necesitamos los diseños de reactores tanto evolucionados como revolucionarios**. Los diseños evolucionados se necesitan para cubrir el hueco que dejarán las centrales nucleares actuales al cesar su funcionamiento y para evitar aumentos importantes en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el futuro inmediato. La construcción de diseños evolucionados mantendría a la vez activos el conocimiento y experiencia acumulados, ayudando así a mantener abierta la opción nuclear. Luego podría seguir uno de los diseños revolucionarios, que produciría de forma sostenible energía segura y competitiva a largo plazo. ■