

Entre males

El Premio Nobel Burton Richter analiza las promesas y los problemas de la energía nuclear

La energía nuclear está experimentando un renacimiento, impulsado por dos necesidades en cierto modo relacionadas entre sí: por un lado, disponer de mucha más energía para hacer posible el crecimiento económico en todo el mundo; por el otro, mitigar el calentamiento de la Tierra provocado por la emisión de gases de efecto invernadero derivados de los combustibles fósiles.

Con la gama actual de combustibles, el crecimiento de la economía hace aumentar las emisiones; el aumento de las emisiones conduce al cambio climático; y el cambio climático, tarde o temprano, acabará por dañar la economía. La energía nuclear ofrece una salida a este ciclo.

Muchos pronósticos de la demanda de energía en el siglo XXI coinciden más o menos en la misma respuesta. El Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados, por ejemplo, en su escenario de crecimiento medio obtiene una duplicación de la demanda de energía primaria para mediados de siglo y un nuevo aumento en prácticamente otro factor de dos para finales de este siglo. Las proyecciones indican que en el año 2030 los países en desarrollo adelantarán a los países industrializados en el uso de energía primaria. China se convertirá en el mayor consumidor de energía del mundo, superando a los Estados Unidos de América, y el crecimiento económico de aquel país y de la India supera ya los valores en que se basó el escenario del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados.

Son ya evidentes las limitaciones de la oferta de dos de los tres combustibles fósiles. Los precios del petróleo se han disparado. La demanda aumenta a un ritmo medio de aproximadamente 1,5 millones de barriles por día, lo que significa que se requeriría la producción de otra Arabia Saudita cada diez años para satisfacer la demanda.

El gas natural es abundante, pero su transporte puede ser un problema. Los precios del gas natural también han subido y actualmente se sitúan entre 9 y 10 dólares por millón de unidades térmicas británicas (BTU), un nivel sin precedentes.

El único combustible fósil que puede garantizar una abundante oferta es el carbón. Sin embargo, este combustible, causa graves problemas de contaminación, y para controlar los problemas ambientales se requieren onerosos medios tecnológicos que tienen consecuencias económicas en gran escala.

La preocupación por el calentamiento de la atmósfera va en aumento, e incluso el Gobierno de los Estados Unidos de América ha reconocido por fin que existe un problema. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) pronostica que, en el caso de que todo siga igual, a finales de siglo el dióxido de carbono en la atmósfera habrá aumentado a 750 partes por millón, y la temperatura de la Tierra habrá subido de 2° a 5° C, menos en el ecuador y más en los polos.

Si este aumento es del orden de los 2° C y se produce de manera gradual, podremos sin duda adaptarnos a él. Si, en cambio, se acerca a los 5° C y se acompaña de una desestabilización del clima, las perturbaciones en la economía y la sociedad serán muy graves.

Es demasiado tarde para evitar del todo el calentamiento de la Tierra, pero estamos a tiempo de limitar sus efectos si dejamos de quemar combustibles a base de carbono. El problema del calentamiento de la Tierra ha incitado a destacados ambientalistas a replantearse su oposición a la energía nucleoelectrónica. Todos ellos se han hecho la siguiente pregunta: ¿Con qué mal prefiero vivir, con el calentamiento de la Tierra o con la energía nuclear?

James Lovelock (ambientalista y autor de la conocida hipótesis Gaia), entre otros, se ha posicionado a favor de la energía nuclear. Cuando el interés económico y el interés ambiental apuntan en la misma dirección, es posible que empiece a haber cambios en esa dirección. Actualmente, ambos intereses coinciden en la necesidad de disponer en gran escala de una energía sin carbono. La energía nuclear es una posible solución.

Aunque la energía nuclear por sí sola no puede solucionar todo el problema, puede desempeñar un papel importante si se logra garantizar al público que es segura, que es posible dar a los desechos nucleares un destino inocuo y que una expansión importante de esa energía no supone un incremento considerable del riesgo de proliferación de armas.

Potencial de crecimiento de la energía nucleoelectrónica

En el mundo hay aproximadamente 440 reactores, que suministran el 16% de la electricidad mundial. Unos 350 de estos reactores se encuentran en países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), donde generan el 24% de la electricidad. El país con el mayor porcentaje de electricidad nuclear es Francia, con un 78%. Para los ambientalistas, Francia debería ser considerada un modelo en el mundo. Su intensidad de dióxido de carbono (CO₂ por unidad de PIB) es la más baja del mundo. Si la intensidad de CO₂ de todo el mundo fuera tan baja como la de Francia, las emisiones de CO₂ se reducirían a la mitad y se frenaría considerablemente el calentamiento de la Tierra.

Las proyecciones del crecimiento de la energía nucleoelectrónica son inciertas, debido a la incertidumbre de los costos y a los tres posibles problemas antes mencionados: la seguridad, el destino de los desechos y el riesgo de proliferación.

Seguridad: La nueva generación de reactores de agua ligera se ha concebido de modo que sea más fácil de usar y mantener que la generación anterior, y tiene más sistemas de seguridad pasivos.

Con un sólido sistema de regulación e inspección puede garantizarse la seguridad de las centrales nucleares. Sin él, los riesgos aumentan. Ninguna industria debe tener la facultad de regularse a sí misma cuando un fallo pueda causar daños más allá de los límites de la propia industria.

Tratamiento del combustible gastado: Si los tres elementos principales del combustible gastado se analizan por separado no parece haber grandes problemas.

El uranio, que constituye la mayor parte del combustible gastado, por sí solo no plantea ninguna dificultad. No es lo suficientemente radiactivo como para suscitar preocupación; contiene más U-235 que el mineral natural y, por tanto, podría servir de insumo para el enriquecimiento, pero podría también ser devuelto a las minas de donde procede.

Tampoco hay dificultades científicas o técnicas con los fragmentos de fisión, el siguiente componente más abundante. La inmensa mayoría de estos fragmentos debe almacenarse únicamente durante unas pocas centurias.

Es fácil construir recintos de contención robustos que duren el tiempo necesario. (Si los egipcios pudieron construir pirámides que han durado 6 000 años, nosotros deberíamos ser capaces de hacer cuando menos lo mismo.)

El problema del combustible gastado se deriva, sobre todo, del último 1%, compuesto de plutonio y de los actínidos menores:

neptunio, americio y curio. Algunos de los componentes de esta mezcla tienen un alto nivel de toxicidad y una vida larga.

Existen dos maneras generales de evitar que este material tenga efectos nocivos para el público: aislarlo de la biosfera durante cientos de miles de años o destruirlo mediante bombardeo por neutrones.

El aislamiento es el principio en que descansa el ciclo abierto del combustible nuclear, defendido por los Estados Unidos por motivos de prevención de la proliferación de armas. En un mundo con un programa nucleoelectrónico mucho mayor que el actual, no creo que el ciclo abierto sea viable.

El problema del ciclo abierto tiene un componente de percepción pública, que dejó en manos de los políticos, y un componente técnico. El primer problema técnico es el calor generado durante los primeros 1 500 años de almacenamiento, que limita la densidad con que puede almacenarse el material en un repositorio. El calor inicial generado por los fragmentos de fisión no es difícil de gestionar. La desintegración del plutonio-241 en americio 241 y la posterior desintegración de éste en neptunio-237 son la principal fuente de calor durante los primeros 1 000 años aproximadamente. El aumento de temperatura permitido de la roca de un repositorio a partir de esta fuente impone limitaciones que determinan su capacidad.

El segundo problema técnico es la radiación de muy larga duración. La cadena de desintegración del plutonio en americio y de éste en neptunio aumenta al máximo el componente de período largo, haciendo necesario el aislamiento de la biosfera durante cientos de miles de años.

Para dar un ejemplo referente a los Estados Unidos, si no se superan las proyecciones que indican que hasta finales de siglo la energía nuclear cubrirá el 20% de las necesidades de electricidad del país, en un escenario basado en el ciclo abierto harían falta nueve repositorios con la capacidad de Yucca Mountain. Si el número de reactores en los Estados Unidos aumenta para mediados de siglo a los 300 GWe proyectados en el estudio del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), el país tendría que abrir un nuevo repositorio del tamaño de Yucca Mountain cada seis o siete años. Esto plantearía un desafío notable, visto que todavía no hemos sido capaces de abrir el primero. En un mundo en que se haya extendido el uso de la energía nucleoelectrónica, el ciclo abierto no parece viable.

La alternativa al ciclo abierto es un sistema de reprocesamiento que separa los principales componentes, da a cada uno de ellos el tratamiento adecuado y se ocupa de manera específica del componente que genera los riesgos a largo plazo. El sistema de reprocesamiento más desarrollado es el de Francia. Este país produce combustible de mezcla de óxidos (denominado también MOX) separando el plutonio (Pu) del combustible gastado y mezclándolo con la cantidad adecuada de uranio (U). El uranio sobrante acaba en una planta de enriquecimiento.

Los fragmentos de fisión y los actínidos menores se vitrifican para colocarlos posteriormente en un repositorio. El vidrio utilizado en la vitrificación parece tener una duración de muchos cientos de miles de años en la arcilla del repositorio propuesto en Francia.

El combustible de MOX y la vitrificación resuelven parte del problema, pero no todo. La siguiente pregunta es qué hacer con el combustible de MOX gastado. El plan es mantenerlo sin reprocesar hasta que aparezcan en el mercado los reactores de espectro rápido. Este tipo de reactores utiliza una mezcla de plutonio y uranio-238 y puede también, en principio, quemar todos los actínidos menores.

Es posible crear una especie de programa de reciclado continuo en que el plutonio derivado del combustible de MOX gastado se utilice para iniciar el sistema de espectro rápido, el combustible gastado del sistema de espectro rápido se reprocese, todo el plutonio y los actínidos menores pasen a formar combustible nuevo, y así sucesivamente. En principio, sólo los fragmentos de fisión terminarían en el repositorio, y únicamente por algunos siglos. Todo esto suena bien, pero queda todavía mucho por hacer antes de poder ponerlo en práctica.

Prevención de la proliferación: Prevenir la proliferación de las armas nucleares es un importante objetivo de la comunidad internacional. La consecución de este objetivo se vuelve más difícil en un mundo en que el programa de energía nuclear se ha ampliado enormemente y abarca a muchos países. Los materiales utilizables para la fabricación de armas pueden desviarse tanto en la etapa inicial del ciclo del combustible nuclear —la fase de enriquecimiento en U-235— como en la etapa final del ciclo —la fase de reprocesamiento y tratamiento del combustible gastado. Cuanto mayor sea el número de lugares en donde se realicen estas actividades, tanto más difícil será su vigilancia.

Los programas clandestinos de desarrollo de armas se han basado en ambas etapas del ciclo del combustible. El Pakistán y Sudáfrica, que renunció voluntariamente a sus armas en un programa supervisado por el OIEA, fabricaron sus armas a partir de la etapa inicial del ciclo del combustible. Libia seguía ese mismo camino hasta que recientemente abandonó sus intentos.

Hay incertidumbre sobre las intenciones del Irán. Corea del Norte, la India e Israel obtuvieron el material para sus armas de la etapa final del ciclo del combustible, utilizando reactores moderados por agua pesada para producir el plutonio necesario.

El grado de sofisticación técnica de estos países va de un extremo al otro y sin embargo todos han logrado sus objetivos. La ciencia en que se basan las armas nucleares es bien conocida, y la tecnología puede dominarse sin demasiadas dificultades mediante el desarrollo interno o la adquisición ilícita.

Debería estar claro para todos que la única forma de limitar la proliferación por parte de los Estados es a través de acuerdos internacionales vinculantes que incluyan la inspección efectiva como elemento disuasorio, y sanciones eficaces para los casos en que la disuasión falle.

La comunidad científica y tecnológica puede dotar a los diplomáticos de mejores instrumentos, que simplifiquen y atenúen el carácter abiertamente evasivo de la vigilancia que se lleva a cabo en cumplimiento de los acuerdos. Estas salvaguardias técnicas constituyen el núcleo de los sistemas utilizados para detectar las actividades de proliferación en

la etapa más temprana posible. Deben desvelar el robo y la desviación de material apto para la fabricación de armas, e identificar las instalaciones clandestinas que pudieran utilizarse para fabricar ese material.

En los últimos tiempos no se han destinado muchos fondos a la elaboración de salvaguardias técnicas avanzadas. Hace falta ejecutar un programa coordinado a nivel internacional para desarrollar ese tipo de salvaguardias. La tecnología de vigilancia y resistencia a la proliferación debería ser parte esencial del diseño de todos los nuevos reactores, plantas de enriquecimiento, instalaciones de reprocesamiento y plantas de fabricación de combustible.

Existen tecnologías, todavía no utilizadas, que pueden dar resultados en tiempo real en esferas críticas. No hay que esperar mucho para saber si el uranio-235 se encuentra dentro de los límites declarados en una planta de enriquecimiento. Una cuestión que se está reexaminando es la relativa resistencia a la proliferación del ciclo del combustible abierto, en comparación con la de diversas estrategias de reprocesamiento.

Un grupo internacional de expertos realizó un análisis para el Departamento de Energía de los EE. UU. y expuso sus conclusiones en un informe de noviembre de 2004 titulado «An Evaluation of Proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuels». La metodología creada para este análisis asigna una calificación del riesgo a cada etapa del ciclo del combustible nuclear y después suma los riesgos a lo largo del tiempo.

Todas las variantes del ciclo abierto y del reprocesamiento tienen más o menos la misma calificación. El aumento del riesgo durante la etapa en que el plutonio es utilizable, en el caso del reprocesamiento, se ve contrarrestado por la disminución del riesgo de desviación durante el enriquecimiento, cuando hace falta menos enriquecimiento, por el aumento de la barrera de radiación tras la segunda quema y por la mayor dificultad de fabricar armas a partir de materiales cada vez más degradados.

Estas calificaciones no deben interpretarse como mediciones precisas. Simplemente indican, a cualquier persona sensata, que el ciclo abierto no es tan diferente del sistema de reprocesamiento.

El Dr. ElBaradei, Director General del OIEA, y George Bush, Presidente de los EE. UU., han propuesto que se comience a estudiar seriamente la internacionalización del ciclo del combustible nuclear. En un escenario internacionalizado, hay países en que se lleva a cabo el enriquecimiento y el reprocesamiento. Se trata de los países proveedores. El resto son países usuarios. Los países proveedores fabrican el combustible nuclear y retiran el combustible gastado para su reprocesamiento, separando los componentes entre los que cabe eliminar y los que deben aprovecharse para fabricar nuevo combustible.

Si este modelo pudiera implantarse de manera satisfactoria, los países usuarios, en especial los más pequeños, obtendrían enormes beneficios. No tendrían que construir instalaciones de enriquecimiento ni tendrían que tratar o eliminar el combustible gastado.

Ninguno de estos procesos es económico en pequeña escala, y es posible que no haya repositorios con la geología adecuada en los países pequeños. A cambio de estos beneficios, los países usuarios renunciarían a un posible acceso a materiales utilizables para la fabricación de armas, procedentes de las etapas inicial y final del ciclo del combustible.

Para que este modelo funcione, debe crearse un régimen internacional que garantice a los países usuarios el acceso al combustible que necesiten. Esto no es fácil, y requiere un conjunto de países proveedores que sea geográfica y políticamente diverso.

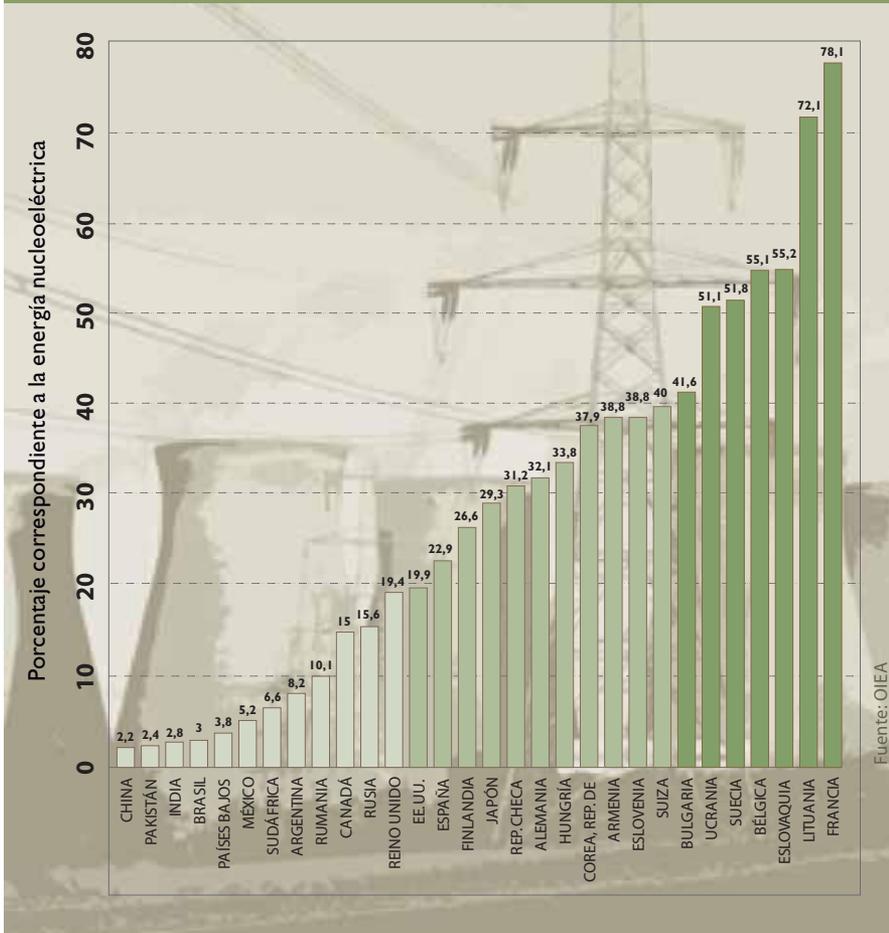
Reducir el riesgo de proliferación derivado de la etapa final del ciclo del combustible es todavía más complejo. Es reducción es imprescindible, sin embargo, porque, como demuestra el ejemplo de Corea del Norte, un país puede «desvincularse» muy rápidamente de un acuerdo internacional y, si dispone del material necesario, desarrollar armas. Corea del Norte se retiró del Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares dando un preaviso mínimo, expulsó a los inspectores del OIEA y reprocesó el combustible gastado de su reactor de Yongbyon, consiguiendo así el plutonio necesario para fabricar bombas en muy poco tiempo.

Los países proveedores que deberían retirar el combustible gastado para su tratamiento difícilmente lo harán si no se resuelve el problema del destino final de esos desechos. En un mundo con un programa de energía nucleoelectrica mucho más extendido que el actual, se generarán ingentes cantidades de combustible gastado. Las proyecciones antes mencionadas pronostican más de un teravatio (eléctrico) de capacidad nuclear, lo que produciría anualmente más de 20 000 toneladas de combustible gastado.

Este combustible gastado contendría alrededor de 200 toneladas de plutonio y actínidos menores y 800 toneladas de fragmentos de fisión. El ciclo del combustible abierto no podría hacer frente a este volumen de desechos sin un nuevo repositorio del tamaño de la Yucca Mountain cada dos o tres años. El reprocesamiento con reciclado continuo en reactores rápidos podría ser la respuesta a esta situación. Únicamente los fragmentos de fisión tendrían que depositarse durante algunos cientos de años —en lugar de cientos de miles de años— en un repositorio.

En síntesis, la energía nuclear es un componente importante de toda estrategia encaminada a dar al mundo los recursos energéticos que necesita para el desarrollo económico y, al mismo tiempo, reducir el consumo de combustibles fósiles y sus emisiones de gases de efecto invernadero. Para que ello se dé a gran escala, harán falta avances científicos y tecnológicos en los terrenos de la física y la política.

La física puede producir reactores mejores y más seguros, métodos perfeccionados de eliminación del combustible gastado y tecnologías de salvaguardias más avanzadas. La mejor manera de lograrlo es en un marco internacional que permita repartir el costo y generar un consenso técnico



internacional sobre lo que se debe hacer. Los países se sentirán tranquilos con los resultados de esa evolución si forman parte de ella.

Mientras que para el desarrollo de la física un marco internacional es la opción mejor, para la ciencia y la tecnología políticas es la única opción posible. El OIEA parece ser el mejor lugar para comenzar a avanzar en esos dos terrenos, y ya se han dado los primeros pequeños pasos. Confío en que en el futuro se darán pasos más decisivos en ambas direcciones.

Burton Richter trabaja en la facultad del Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) de la Universidad de Stanford y fue Director del SLAC de 1984 a 1999. En 1976 fue galardonado con el Premio Nobel de Física, que compartió con Samuel C. Ting, «por su trabajo pionero en el descubrimiento de un nuevo tipo de partícula elemental pesada».

Correo electrónico: brichter@slac.stanford.edu.

Este artículo es una adaptación de la conferencia que el autor pronunció ante el Foro científico del OIEA en septiembre de 2005. En el sitio web del OIEA, www.iaea.org, figura más información al respecto. Los gráficos y cuadros que acompañaron la conferencia pueden consultarse en www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2005/SF_Presentations05/Session1/BRichter_IAEA_Session_1.pdf.