

## Futuros sistemas de energía nuclear: Generar electricidad, quemando desechos

*La fusión de la tecnología de aceleradores con reactores ofrece perspectivas para producir energía y quemar el plutonio y los desechos radiactivos*

por Viktor  
Arkipov

Los desechos de alta radiactividad que se generan durante la producción de energía constituyen uno de los mayores problemas que emanan del uso de la energía nuclear, y que debe resolverse de manera eficiente y segura. Si bien existen soluciones técnicas, como los repositorios geológicos profundos, la idea que tiene el público sobre la seguridad de la tecnología ha afectado, y, en muchos casos, demorado, el avance en materia de evacuación de desechos radiactivos. Ello se debe fundamentalmente, entre otras razones, a que muchos de los radisótopos generados por la fisión son de período largo y su período de semidesintegración es del orden de 100 000 a 1 millón de años. Los problemas de percepción podrían reducirse considerablemente si existiera una forma de quemar o destruir los desechos radiactivos de período largo más tóxicos durante la producción de energía.

Recientemente se ha introducido una nueva opción tecnológica, o más bien, una innovación viable derivada de ideas anteriores. Se trata de la fusión de las tecnologías de aceleradores y de reactores de fisión en un sistema único que tiene la posibilidad de generar electricidad de manera eficiente a partir de la fisión nuclear y/o transmutar los desechos radiactivos de período largo. En su forma más simple, en este concepto de producción de energía accionada por aceleradores se utilizan neutrones producidos por un haz de protones de alta energía para accionar un conjunto fértil que contiene combustible fisionable y desechos radiactivos. El conjunto fértil es como un reactor en el que la fisión es la fuente de energía; sin embargo, a diferencia de un reactor convencional, es un conjunto subcrítico y sin el acelerador no puede sostener una reacción en cadena. En este sistema el uranio, el plutonio o el torio se podrían utilizar como combustible.

Lo mismo que destruye los desechos de alta radiactividad, el sistema accionado por aceleradores ayudaría a satisfacer las crecientes necesidades de energía al producir electricidad, la forma de energía más conveniente y útil. En los dos próximos decenios, la demanda de todas las fuentes de energía aumentará, y ojalá que se puedan satisfacer las necesidades de la población mundial, cada vez mayor, y que, según cálculos de las Naciones Unidas, se acercará a los 8,5 millardos de personas en el año 2025.

### Transmutación de desechos radiactivos

La gestión de desechos radiactivos por métodos ecológicamente inocuos es un problema importante que afrontan todos los países que desarrollan una industria nuclear. En muchos países se ha convertido en una cuestión política grave que atrae una enorme atención crítica del público en general.

El concepto del ciclo del combustible nuclear cerrado se consideró siempre como la transmutación (el quemado) solamente del plutonio y del uranio reciclado, y los actínidos inferiores (neptunio, americio, curio) se destinaban a la evacuación geológica definitiva. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, están surgiendo nuevas ideas: la disminución de la cantidad de actínidos reduciría las exigencias de los repositorios definitivos y los haría relativamente menos costosos.

La transmutación neutrónica de actínidos inferiores radiactivos de período largo mediante el proceso de fisión —que comprende la producción de energía y la conversión simultánea de éstos en nucleidos de período más corto— es objeto de profundo análisis en los círculos técnicos. Asimismo, se propone la transmutación neutrónica de productos de fisión de período largo seleccionados.

Se han sugerido varias posibilidades para la transmutación de nucleidos de período largo mediante reacciones nucleares. En un inicio, la mejor opción parecía ser el uso de los reactores nucleares. Sin embargo, recientemente se ha mani-

El Sr. Arkipov es consultor de la Sección de Desarrollo de la Energía Nucleoeléctrica de la División de Energía Nucleoeléctrica y del Ciclo del Combustible del OIEA.

festado un renovado interés en lo que se denomina sistemas accionados por aceleradores (ADS), tecnología, al parecer, promisoría.

El interés está dado por el interrogante de qué hacer con el plutonio excedente acumulado en los arsenales de armamentos, y en los inventarios, mucho mayores y crecientes, de combustible gastado procedente de las operaciones nucleares industriales. Existen serias preocupaciones políticas acerca del uso indebido del plutonio y la liberación al medio ambiente de este material muy tóxico. Se están examinando muchas opciones para evacuar este plutonio, y una de ellas consiste en quemarlo mediante la tecnología de los ADS. Con esos sistemas se producirían grandes cantidades de energía eléctrica y, al mismo tiempo, se destruiría el plutonio. Ello parece ser una mejor solución para el problema del plutonio que la del almacenamiento durante varios milenios.

Las posibilidades del concepto de accionamiento por aceleradores también pueden aplicarse al quemado simultáneo de los productos de fisión de período largo y los actínidos presentes en los desechos generados por los reactores nucleares de potencia con fines industriales. El objetivo del quemado de esos productos de fisión es destruir los isótopos de período largo que, dada su movilidad, serían los que más aportarían a las dosis radiactivas liberadas de un repositorio, a saber, el tecnecio 99, el yodo 129 y el cesio 135. Estos tres isótopos representan, por su peso, un 5% del total de los productos de fisión generados durante la producción de energía y son los causantes principales de los posibles riesgos a largo plazo de la evacuación geológica. Si se logra la destrucción interna de estos tres isótopos, el resto de los desechos de los productos de fisión estables y de período corto puede confinarse en almacenamiento tecnológico, quizás incluso en el mismo lugar donde se produce la energía.

Para quemar al máximo los productos de fisión es necesario tratarlos en el emplazamiento. El perfeccionamiento del conjunto fértil blanco accionado por aceleradores para este quemado permite reducir de manera considerable el volumen y la semidesintegración de la corriente de desechos, lo que simplifica los requisitos de almacenamiento a largo plazo y de evacuación segura. Incluso, se prevé que este sistema permita producir energía eléctrica suficiente para cubrir los costos de inversión y de explotación de la instalación, aunque la función primaria del sistema sea quemar desechos radiactivos.

Los objetivos son loables; sin embargo, se debe tener presente que la tecnología aún requiere llevar a cabo muchas actividades de investigación y desarrollo. Todavía quedan por probar la viabilidad técnica y, en especial, la racionalidad económica y radiológica de la transmutación. En consecuencia, se deberá hacer una comparación y evaluación cuidadosas de los argumentos a favor y en contra del fraccionamiento y la transmutación de los desechos radiactivos.

## Combinando producción de energía con transmutación

La idea de utilizar los aceleradores en las aplicaciones de la energía nuclear no es nueva, sino que ya había sido propuesta por E. Lawrence, inventor del ciclotrón, a fines del decenio de 1940. En los cincuenta, Lawrence promovió el desarrollo de un acelerador de ensayo de materiales en Livermore con el objetivo de generar flujos neutrónicos intensos para producir plutonio. El Chalk River Laboratory de Canadá comenzó estudios intensivos de sistemas basados en aceleradores para producir combustible nuclear para reactores de agua pesada. Asimismo, a fines de los setenta y principios de los ochenta, científicos del Laboratorio Nacional de Brookhaven promovieron activamente las opciones basadas en aceleradores. Durante los últimos cinco años, científicos del Laboratorio Nacional de Los Alamos han venido reevaluando la tecnología basada en aceleradores a la luz de los avances tecnológicos actuales y de las perspectivas mundiales en materia de energía.

Hace poco, Carlo Rubbia, laureado con el Premio Nobel y ex Director General de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), ha propuesto y sigue promoviendo activamente un sistema de generación de energía accionado por aceleradores, que se basa en el ciclo del torio-uranio.

Existen dos tipos de aceleradores que podrían accionar este sistema aproximadamente a 1 GeV y a corrientes medias del orden de 10 a 100 mA. La primera opción es la de utilizar un acelerador lineal; la segunda, la de emplear un acelerador circular que tiene la ventaja de ser un sistema más compacto. Si bien las dos opciones permiten obtener la energía necesaria, ambas requieren un desarrollo tecnológico para alcanzar las intensidades de haces necesarias. El ciclotrón está limitado a corrientes de 10 a 15 mA debido a la dificultad para confinar adecuadamente el haz, mientras que se prevé que el acelerador lineal sea capaz de producir una corriente de haces quizás de 100 a 200 mA. En el modo pulsado, los aceleradores lineales ya producen esas corrientes, sin embargo, aún se necesita un desarrollo tecnológico significativo para lograr una operación casi continua para las corrientes más altas. Un sistema que genere 15 mA de protones y 800 MeV puede accionar un conjunto fértil para que produzca 200 MW de energía eléctrica. A este nivel de energía, el acelerador circular es una opción posible. El acelerador lineal de alta corriente podría accionar un sistema que produzca 1200 MW eléctricos. En ambos casos, se prevé que entre un 15% y un 20% de la energía eléctrica total se utilice para accionar el acelerador.

Varios países y organizaciones internacionales investigan en estos momentos diversas opciones técnicas de transmutación y producción de energía mediante los ADS. Una serie de proyectos sobre los ADS son objeto de estudio en el Japón, en el marco del Proyecto OMEGA (Opciones para el

mejor aprovechamiento de los actínidos y productos de fisión); en los Estados Unidos (en los laboratorios nacionales de Los Alamos y Brookhaven); en Francia (Commissariat à l'énergie atomique, o CEA); en la Federación Rusa, en la CERN, en la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos; y en la Comisión Europea (CE).

Los conceptos de los ADS pueden clasificarse según sus características físicas y objetivos finales. La clasificación se basa en el espectro de la energía neutrónica, la forma del combustible (sólido, líquido), el ciclo del combustible y el tipo de refrigerante/moderador, y los objetivos del sistema. Al igual que los reactores, los sistemas accionados por aceleradores pueden concebirse para que trabajen en dos modos de espectro neutrónico diferentes: en neutrones rápidos, o en térmicos. Asimismo, en la CERN, se trabaja en el diseño de un sistema que explotará las resonancias de las secciones eficaces de neutrones en lo que podría clasificarse como un modo del "neutrón de resonancia". Tanto el sistema rápido como el térmico se están examinando para combustibles sólidos y líquidos. Incluso, se ha propuesto el combustible cuasilíquido sobre la base del concepto del combustible en forma de partículas (lecho de bolas), desarrollado en Brookhaven.

Como ya se señaló, el objetivo de algunos ADS es transmutar los componentes existentes en el combustible gastado procedente de los reactores nucleares, en especial el plutonio y los actínidos inferiores, independientemente de que se esté o no produciendo energía. Otros sistemas están diseñados para aprovechar el ciclo del combustible del torio para la producción de energía. La mayoría de los conceptos se basan en aceleradores lineales. Sin embargo, el grupo de la CERN e investigadores de Brookhaven proponen utilizar un ciclotrón para acelerar protones.

El sistema de producción de energía accionado por aceleradores propuesto en Los Alamos es un acelerador lineal de haces de protones de alta energía, un blanco de metal pesado (plomo o plomo-bismuto), y un sistema de combustible líquido. El combustible líquido resulta atractivo porque elimina los procesos de fabricación de combustible sólido y la gestión de los haces de combustible y, al mismo tiempo, permite la extracción continua de una parte significativa de los productos de fisión durante la operación. Esta extracción mejora la economía del combustible y permite destruir los componentes de período largo de los productos de fisión. Se escogió la opción de las sales fundidas porque funciona a bajas presiones, tiene estructuras mecánicas más sencillas, menos pérdidas de absorción de neutrones y requiere menos cantidad de combustible líquido.

El sistema nuclear subcrítico accionado por aceleradores propuesto por Carlo Rubbia y sus colaboradores de la CERN es un sistema de neutrones rápidos. Los elementos combustibles están en forma sólida, con agujas combustibles revesti-

das. El combustible nominal es torio/uranio 233, aunque también puede funcionar con plutonio (ya sea de calidad apropiada para armas o para reactores) y también puede escindir los actínidos más pesados como el americio y el curio. Varias de las características de seguridad pasiva del concepto se basan en sus propiedades físicas.

En el Japón, en los dos últimos decenios, el Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica (JAERI) ha realizado estudios de diseño de sistemas de transmutación. Se están estudiando dos tipos de conceptos de los ADS: un sistema blanco/sólido núcleo y un sistema blanco de sales fundidas/núcleo. En varias universidades del Japón se está estudiando el concepto de un reactor de sales fundidas impulsado por aceleradores. El JAERI iniciará muy pronto el Proyecto sobre Ciencias Neutrónicas que tiene el objetivo de introducir innovaciones científicas y tecnológicas para el siglo XXI en las esferas de las ciencias básicas y la tecnología nuclear usando neutrones. El estudio de sistemas de transmutación accionados por aceleradores y el desarrollo de un acelerador intenso de protones son partes importantes de este proyecto.

En los últimos años, diferentes laboratorios del CEA, de Francia, han venido trabajando en varios aspectos de la tecnología y la física de los ADS. En 1995, se decidió iniciar un programa limitado, dedicado a la validación experimental de los principales aspectos relacionados con un sistema genérico accionado por aceleradores.

En centros científicos de la Federación de Rusia, varios grupos han venido trabajando en aspectos de la tecnología y en la física de los ADS. Se están examinando distintos conceptos de los ADS con estructuras y materiales diferentes para los conjuntos blanco y fértil. Algunos estudios relacionados con el fraccionamiento y la transmutación, los llamados proyectos de conversión, reciben apoyo financiero de instituciones internacionales, principalmente en el marco del Centro Internacional de Ciencia y Tecnología.

La AEN tiene un amplio programa de trabajo internacional en relación con las cuestiones de la transmutación y la separación de los productos de fisión y los actínidos. Recientemente el Comité de Desarrollo Nuclear de la AEN creó un grupo de expertos para estudiar los sistemas de fraccionamiento y transmutación de actínidos y productos de fisión. El Comité de Ciencia Nuclear de la AEN tiene una serie de proyectos de cooperación que abarcan los aspectos científicos y físicos de los diferentes conceptos de transmutación.

La CE coordina los proyectos de los Estados Miembros sobre la base de la repartición de los gastos y realiza estudios sobre los actínidos inferiores, los combustibles y el fraccionamiento en el Instituto Europeo de Elementos Transuránicos. El Instituto se ha dedicado a esa investigación durante 30 años. Los estudios sobre los combustibles que contienen actínidos inferiores han conducido a la realización de una serie de experimentos sobre irradiación, algunos de los cuales

ya han concluido. Mediante otro programa, la CE presta especial atención a los efectos de las tecnologías basadas en aceleradores sobre la seguridad de la fisión nuclear. Uno de los objetivos es coordinar esfuerzos para crear, en Europa, las bases científicas y tecnológicas de los proyectos de cooperación.

### **Función de las actividades del OIEA en esta esfera**

En esta esfera, las actividades del OIEA se emprenden en el marco de un programa sobre los nuevos sistemas de energía nuclear para la generación de energía y la transmutación. En este sentido, el objetivo es constituir un foro mundial para el examen técnico y el debate de los programas, proyectos y temas del desarrollo y la introducción de la energía nuclear, incluidos los ADS. Las actividades se centran en la recopilación y difusión de los informes de situación y la información técnica, y en la prestación de apoyo a las investigaciones coordinadas. Entre dichas actividades figuran las siguientes:

*Preparación y publicación de un informe de situación sobre los ADS.* Este trabajo es el resultado de debates técnicos efectuados en un Programa Científico Especial sobre el "Empleo de aceleradores de alta energía para la transmutación de actínidos y la producción de energía", que tuvo lugar en Viena, en 1994, durante la celebración de la Conferencia General del OIEA. El informe está destinado a planificadores, personal directivo y otras partes interesadas en el desarrollo de los ADS, y ofrece una reseña de las actividades de desarrollo en ejecución, los diferentes conceptos que se están formulando y la situación de sus proyectos, así como las tendencias típicas del desarrollo, y evaluaciones de las posibilidades de este sistema para producir energía, quemar el plutonio y transmutar los desechos radiactivos. Contiene trabajos preparados por expertos de seis países y dos organizaciones internacionales, así como resúmenes de muchas esferas diferentes de la tecnología de los ADS.

*Informe de situación sobre el ciclo del combustible basado en el torio.* En este informe se actualizará la información disponible en los últimos seis años e indicará las esferas que requieren investigaciones adicionales. Contendrá trabajos de países específicos y de grupos técnicos, así como pormenores de sus conceptos.

*Programa coordinado de investigaciones.* Este programa se centra en el uso del ciclo del combustible basado en el torio en los ADS para incinerar

el plutonio y reducir la toxicidad de los desechos a largo plazo. La primera etapa comprende puntos de referencia sobre los ADS y cálculos neutrónicos y uno de sus objetivos es lograr consenso sobre los métodos de cálculo y los datos nucleares conexos.

Reunión de Comité Técnico sobre viabilidad y motivación respecto de los métodos híbridos de generación y transmutación de la energía nuclear. En septiembre de 1997, se reunirán expertos técnicos para examinar y debatir las ventajas e inconvenientes de los métodos híbridos en relación con la situación actual y la posible dirección futura de la energía nucleoelectrónica en el mundo, así como para presentar opciones y recomendaciones a los Estados Miembros del OIEA en esta esfera.

### **Retos y oportunidades**

Antes de que puedan demostrarse las posibilidades del concepto de los ADS, quedan por explorar y responder muchos interrogantes técnicos y de ingeniería. Las actividades futuras requerirán más cooperación internacional para mancomunar conocimientos especializados y recursos.

En muchos sentidos, vale la pena intentar aplicar los sistemas accionados por aceleradores. Produciendo electricidad, estos sistemas pueden contribuir a satisfacer las crecientes necesidades de energía del mundo; e incinerando el plutonio y los desechos de radiactividad alta, pueden ayudar a lograr los objetivos de protección del medio ambiente y de la gestión segura de los desechos. Con algunos de los ADS en desarrollo, es posible producir energía a partir del torio, elemento que abunda en un conjunto fértil subcrítico y seguro con una corriente de desechos nucleares mínima. Además, se prevén sistemas que permitan quemar el plutonio procedente de los armamentos e incinerar el combustible nuclear gastado, incluidos sus principales productos de fisión, procedente de las centrales nucleares con fines industriales.

Actualmente, varios institutos científicos y laboratorios nacionales y regionales del mundo se dedican a actividades de investigación y desarrollo de sistemas accionados por aceleradores. A nivel mundial, los programas del OIEA en esta esfera contribuyen a fomentar el intercambio de información y las investigaciones conjuntas sobre temas específicos. Esta labor es prueba del aumento del interés por la tecnología de los ADS como instrumento práctico que ayude a la consecución de los objetivos internacionales en materia de energía y de protección del medio ambiente.