

Impulso a la innovación

Los países estudian la próxima generación de sistemas de energía nucleoelectrónica

Por Judith Perera

En los últimos años han surgido varias iniciativas multinacionales centradas en las perspectivas de desarrollo de la energía nuclear a mediano y largo plazos. Éstas son: el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) dirigido por los Estados Unidos, el Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO) del OIEA, y la red europea Michelangelo en favor de la competitividad y la sostenibilidad de la energía nuclear en la UE (Micanet). Se han realizado también dos estudios importantes: una investigación conjunta del OIEA con la Agencia Internacional de Energía y la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la OCDE, sobre el tema: *Desarrollo de reactores nucleares innovadores; oportuna des para la cooperación internacional*; y un estudio interdisciplinario del Massachusetts Institute of Technology (MIT) titulado: *El futuro de la energía nuclear*.

Todos se ocupan en su mayor parte del mismo tema: el estudio de sistemas nucleares innovadores, incluidos los reactores y ciclos del combustible. No obstante, aunque fueron inspirados por el mismo conjunto de apremiantes razones, tienen ciertas diferencias, y desde luego, la importancia que atribuyen al ciclo del combustible nuclear. El GIF y el INPRO son dos iniciativas que podrían potenciar la cooperación internacional.

La iniciativa GIF

El GIF es básicamente una iniciativa de los Estados Unidos. En 1997, el Comité de Asesores de Ciencia y Tecnología del Presidente examinó las actividades nacionales de I + D en materia de energía y elaboró un programa para abordar las necesidades energéticas y ambientales del siguiente siglo. Este programa señaló la importancia de garantizar una opción viable basada en la energía nuclear con miras a satisfacer las necesidades energéticas futuras, incluso actividades de I + D debidamente orientadas a salvar los principales obstáculos a esta opción, como por ejemplo, los relacionados con el combustible nuclear gastado, la proliferación, los factores económicos y la seguridad. En respuesta a este programa, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) emprendió la Iniciativa de investigaciones de energía nuclear (NERI) a fin de examinar las cuestiones científicas y técnicas que afectan al uso futuro de la energía nuclear en los Estados Unidos. En 1998, el DOE creó, como órgano independiente, el Comité consultivo para la investigación de la energía nuclear (NERAC) destinado a asesorar al Secretario y al Director de la Oficina de Energía Nuclear, Ciencia y Tecnología (NE) sobre el programa de tecnología nuclear en el sector civil del DOE.

El GIF centra su interés en el desarrollo cooperativo y la demostración de uno o más sistemas de energía nuclear de la cuarta generación que podrían ofrecer ventajas económicas así como en materia de seguridad, fiabilidad y sostenibilidad, y comercializarse para 2030. Su objetivo es compartir los conocimientos especializados, los recursos y las instalaciones de ensayo, para aumentar la eficiencia y evitar la superposición de tareas. (Véanse en el cuadro los miembros del GIF.)

En la Política Energética Nacional (NEP), dada a conocer en mayo de 2001 por el Grupo de formulación de política energética nacional del Vicepresidente, se apoya el desarrollo de la energía nuclear como elemento principal para satisfacer las crecientes necesidades de energía de los Estados Unidos. En septiembre de 2002, el Subcomité del NERAC sobre planificación de la tecnología de generación IV publicó el Plan de desarrollo de tecnología de generación IV para los sistemas de energía nuclear. En coordinación con el GIF, se seleccionaron seis conceptos de reactores innovadores que serían objeto de nuevas actividades conjuntas de investigación y desarrollo, junto con los ciclos del combustible conexos, así como tema central de los proyectos de I + D patrocinados por la NERI. Estos conceptos son:

- Reactor rápido refrigerado por gas (GFR) – reactor de espectro de neutrones rápidos, refrigerado por helio y con ciclo del combustible cerrado;

Miembros del INPRO	Miembros del INPRO y el GIF	Miembros del GIF
Alemania	Argentina	Argentina
Argentina	Brasil	Brasil
Brasil	Canadá	Canadá
Bulgaria	Francia	Estados Unidos
Canadá	República de Corea	Francia
China	Sudáfrica	Japón
España	Suiza	Reino Unido
Federación de Rusia	Organización miembro:	República de Corea
Francia	Comisión Europea	Sudáfrica
India		Suiza
Indonesia		Organizaciones miembros:
República Checa		FORATOM
República de Corea		Comisión Europea
Países Bajos		
Paquistán		
Sudáfrica		
Suiza		
Turquía		
Organización miembro:		
Comisión Europea		

Miembros del INPRO en junio de 2004. En las reuniones del GIF participan observadores de la Euratom, el OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear.

- ▶ Reactor de muy alta temperatura (VHTR) – reactor refrigerado por helio y moderado por grafito con ciclo del combustible abierto del uranio;
- ▶ Reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR) – reactor refrigerado por agua a alta presión y alta temperatura que funciona por encima del punto crítico termodinámico del agua;
- ▶ Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) – reactor refrigerado por sodio de espectro rápido y ciclo del combustible cerrado para la gestión eficiente de los actínidos y la conversión del uranio fértil;
- ▶ Reactor rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR) – reactor de espectro rápido refrigerado por metal líquido eutéctico de bismuto– plomo con ciclo del combustible cerrado para la conversión eficiente de uranio fértil y la gestión de los actínidos;
- ▶ Reactor de sales fundidas (MSR) – produce energía de fisión en una mezcla combustible de sales fundidas en circulación, con un reactor de espectro epitérmico y un ciclo del combustible de reciclaje completo de actínidos.

Se espera que puedan introducirse en el mercado dentro de los próximos treinta años. Sus ventajas comparativas son: reducción de los gastos de capital, aumento de la seguridad nuclear, generación mínima de desechos nucleares y mayor reducción del riesgo de proliferación de materiales utilizables para la fabricación de armas. Ya se iniciaron los trabajos relacionados con cuatro de los sistemas seleccionados. Los objetivos establecidos para los sistemas de energía nuclear de la generación IV son:

- ▶ Sostenibilidad: cumplir los objetivos relacionados con la calidad del aire y promover la disponibilidad de sistemas a largo plazo y el aprovechamiento del combustible para la producción de energía en todo el mundo; minimizar y gestionar los desechos nucleares, y reducir su período de gestión;
- ▶ Factores económicos: ofrecer más ventajas económicas que otras fuentes de energía durante el ciclo de vida útil; equiparar su nivel de riesgo financiero con el de otros proyectos energéticos;
- ▶ Seguridad y fiabilidad: sobresalir por su seguridad y fiabilidad; reducir al mínimo la probabilidad de daños en el núcleo del reactor y su magnitud; eliminar la necesidad de adoptar medidas de emergencia fuera del emplazamiento;
- ▶ Resistencia a la proliferación y protección física: constituir la vía menos deseable y atractiva para la desviación o el robo de materiales utilizables para la fabricación de armas, y brindar mayor protección física contra actos de terrorismo.

En los estudios realizados por el GIF se han definido cuatro clases de ciclos del combustible nuclear, incluido el del ciclo abierto, con reciclaje parcial del plutonio, con reciclaje completo del plutonio y con reciclaje completo de elementos transuránicos. Se elaboraron modelos de estos ciclos para un siglo sobre la base de las proyecciones de la demanda de energía nuclear realizadas por el Consejo Mundial de la Energía y el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados.

Quedó demostrado que el ciclo del combustible abierto es el que más recursos uraníferos emplea, y el que genera la mayor cantidad de desechos en forma de combustible gastado, pero que los desechos que

se producen son aún pequeños en comparación con otras tecnologías energéticas. Los recursos uraníferos son suficientes para sustentar un ciclo del combustible abierto, al menos hasta mediados de siglo. Sin embargo, el factor restrictivo es la disponibilidad de espacio para los repositorios, cuestión que cobra importancia y que exige la creación de nuevos repositorios en algunos decenios. A la larga, pasados 50 años, la disponibilidad de recursos uraníferos también se convertirá en un factor limitante.

Los sistemas que emplean un ciclo del combustible completamente cerrado pueden reducir el espacio de los repositorios y los requisitos de comportamiento, aunque los costos deberán mantenerse en niveles aceptables. Los ciclos de combustible cerrados permiten separar los desechos nucleares y realizar la gestión de cada parte aplicando la mejor estrategia. Entre las estrategias avanzadas para la gestión de los desechos se cuentan la transmutación de nucleidos seleccionados, la gestión rentable del calor de desintegración, la flexibilidad en el almacenamiento provisional y la adaptación de los desechos a repositorios geológicos específicos. Se cree que por esta vía será posible reducir la radiotoxicidad de período largo de los desechos destinados a repositorios geológicos en al menos un orden de magnitud, al recuperarse la mayor parte de los elementos pesados radiactivos de período largo.

También se podrían utilizar varios reactores juntos en ciclos del combustible simbióticos, combinando reactores térmicos y reactores rápidos. Los actínidos de los sistemas térmicos pueden reciclarse en sistemas rápidos, reduciendo las existencias de actínidos en todo el mundo. El aumento de la capacidad de quemado de los reactores térmicos refrigerados por agua o gas también puede contribuir a la gestión de los actínidos en un sistema simbiótico. En los sistemas térmicos también se pueden desarrollar características como la producción de hidrógeno en reactores de gas a alta temperatura o reactores de agua ligera muy económicos, como parte de un sistema global que ofrezca un futuro más sostenible.

En los estudios del GIF se llegó también a la conclusión de que la energía nuclear no tiene similar en el mercado, ya que su ciclo del combustible sólo representa alrededor del 20% de su costo de producción. Estos estudios indican además que es posible adoptar un ciclo del combustible más avanzado que el ciclo abierto a un costo razonable.

Proyecto internacional: INPRO

El INPRO se inició en el año 2000 en virtud de una resolución que los Estados Miembros del OIEA aprobaron con miras a garantizar que se disponga de energía nuclear como recurso sostenible que ayude a satisfacer las necesidades energéticas en el siglo XXI. Para que la energía nuclear desempeñe una función importante en el suministro mundial de energía, se necesitarán enfoques innovadores que den respuesta a las preocupaciones sobre la competitividad económica, la seguridad, los desechos y los posibles riesgos de proliferación. En consecuencia, el INPRO adopta una perspectiva a más largo plazo que las demás iniciativas, y es la única que aborda los problemas desde el punto de vista de los posibles usuarios de los países en desarrollo y determina sus necesidades concretas. La definición de “usuarios” del INPRO abarca una amplia gama de grupos que comprende desde inversores, diseñadores, explotadores de centrales, órganos reguladores, organizaciones y autoridades locales, gobiernos nacionales, ONG y medios de comunicación hasta los usuarios finales de la energía.

El INPRO trata de reunir a todos los Estados Miembros del OIEA interesados, tanto a los que poseen como a los que usan la tecnología, para analizar de conjunto las medidas internacionales y nacionales necesarias para lograr las innovaciones deseadas en los reactores y los ciclos del combustible nucleares. Estos Estados deben utilizar una tecnología sólida y económicamente competitiva que se base – en la medida de lo posible – en sistemas que posean características de seguridad inherentes y minimicen el riesgo de la proliferación y los efectos sobre el medio ambiente. El objetivo es iniciar un proceso que involucre a todos los interesados directos pertinentes, y que repercuta, aproveche y complemente las actividades de las instituciones existentes y las iniciativas en curso en el plano nacional e internacional.

El ámbito del INPRO abarca los reactores y las instalaciones del ciclo del combustible nucleares previstos para entrar en funcionamiento en el futuro, junto con los ciclos del combustible conexos. Aunque el INPRO tiene en cuenta una escala cronológica de 50 años para el análisis necesario, esto no implica que en ese tiempo se utilizarán las tecnologías. No obstante, se espera que en ese período se pongan en servicio y coexistan una serie de diseños actuales, evolutivos e innovadores. El INPRO todavía no se ha dedicado a ninguna tecnología específica.

En 2001-2003, durante la fase 1A, el INPRO elaboró conjuntos de principios básicos (PB), requisitos de los usuarios (RU) y criterios para comparar distintos conceptos y enfoques con respecto a las cuestiones clave que se debaten en relación con la futura función de la energía nuclear: competitividad económica, seguridad, desechos, proliferación, seguridad y protección físicas, y sostenibilidad. No se concentró sólo en las necesidades tecnológicas; también formuló recomendaciones sobre cuestiones institucionales y jurídicas, y sobre diversos asuntos de infraestructura, principalmente en el contexto de una continua mundialización. Esta fase culminó en junio de 2003, luego de establecerse una metodología y directrices para evaluar distintos conceptos y enfoques.

La fase 1B, que comenzó en julio de 2003, comprende la validación de la metodología del INPRO mediante estudios de caso y exámenes de tecnologías innovadoras relacionadas con la energía nuclear presentados por los Estados Miembros. Los miembros realizarán este examen, basándose en los PB, los RU, los criterios y la metodología establecidos durante la fase 1A. También incluirá la recopilación preliminar de información sobre reactores y ciclos del combustible innovadores. Seis Estados Miembros del INPRO se ofrecieron para realizar estudios de caso nacionales, en los que aplicarían la metodología del INPRO a sistemas innovadores de energía nuclear (INS) nacionales seleccionados:

- ▶ Argentina: El sistema CAREM-X que incluye el reactor CAREM y el proceso SIGMA de enriquecimiento del combustible.
- ▶ India: Un reactor APHWR y el ciclo del combustible que incluye un FBR y un ADS para la transmutación de desechos.
- ▶ República de Corea: Tecnología del ciclo del combustible DUPIC.
- ▶ Federación de Rusia: Reactores del tipo BN-800 cargados con combustible que contiene nitruro y ciclo del combustible adyacente en estado de equilibrio.
- ▶ China: Reactor de alta temperatura de lecho de bolas.

▶ República Checa: Reactor de sales fundidas (concepto elegido por el Foro Internacional de la Generación IV (GIF)).

Además, varios equipos compuestos por expertos independientes realizan estudios de caso, que abarcan las tecnologías, que no han sido abordadas por los estudios de caso nacionales, con el fin de obtener la validación más completa posible de la metodología.

Los resultados finales de estos estudios y de varios estudios de caso se presentarán a la séptima reunión del Comité de Dirección del INPRO, a finales de 2004. En esa ocasión se evaluarán los conceptos innovadores de reactores y de ciclos del combustible nucleares a la luz de las necesidades y los criterios seleccionados. Sobre la base de los resultados de la primera fase, en la fase 2 se estudiarán las tecnologías existentes y la viabilidad de iniciar un proyecto internacional.

Hasta ahora, el INPRO ha dependido del apoyo político, financiero y técnico de los Estados Miembros del OIEA (en particular de Rusia, que prestó el principal apoyo financiero para el proyecto), pero a partir de 2004 se ha incluido una parte de la financiación en el presupuesto ordinario del OIEA. (*Véanse en el cuadro los miembros del INPRO.*)

La principal característica de la metodología del INPRO es la información que proporciona sobre el potencial de la energía nuclear y las consecuencias de su empleo. En esta metodología se tienen en cuenta las opciones de desarrollo de la sociedad y sus necesidades energéticas, así como los gastos conexos calculados en trabajo, recursos y tiempo. Los miembros del INPRO dispondrán así de un instrumento que los ayudará a determinar y evaluar los componentes necesarios para un futuro sistema de energía nuclear como los reactores, las instalaciones de procesamiento de los desechos, y las instalaciones de fabricación y reciclaje del combustible. También ayudará a los Estados a determinar las actividades de investigación, desarrollo y demostración (ID + D) que se necesiten para mejorar los actuales componentes con vista a su futura aplicación y desarrollar los nuevos componentes que se requieran.

En cuanto a los factores económicos, el INPRO estudia cuatro escenarios de mercado que abarcan posibles cambios futuros, caracterizados por diversos niveles de mundialización y regionalización y distintos criterios de crecimiento económico frente a las restricciones ambientales. El INPRO considera que los sistemas de energía nuclear innovadores (INS) podrán contribuir significativamente a satisfacer las necesidades energéticas futuras, siempre que sean económicamente competitivos. No obstante, para que el costo unitario total de la energía siga siendo competitivo, se deberán considerar y controlar todos los costos inherentes (costos de capital, explotación y mantenimiento, combustible, etc.). Los límites en los costos del combustible implican límites en los costos de capital y de explotación de las instalaciones del ciclo del combustible, que incluyen las minas, el procesamiento y enriquecimiento del combustible, el reprocesamiento de éste, y la clausura y gestión a largo plazo de los desechos procedentes de esas instalaciones.

En lo que concierne a la sostenibilidad, el INPRO ha establecido dos principios básicos, uno relacionado con la aceptabilidad de los efectos de la energía nuclear en el medio ambiente y el otro, con la capacidad de los sistemas de energía nuclear innovadores para suministrar energía de manera sostenible en el siglo XXI. La protección del medio ambiente se considera fundamental, y para

ser sostenible el sistema no debe agotar los recursos importantes (como el material fósil/fértil o el agua) antes del final de su vida útil prevista. El sistema debe también utilizarlos al menos tan eficientemente como las opciones aceptables, tanto nucleares como no nucleares.

En lo que respecta a la seguridad, los principios y requisitos del INPRO se basan en la extrapolación de las tendencias actuales e intentan abarcar los posibles intereses de los países en desarrollo y los países en transición. En el caso de los reactores nucleares, las principales funciones de la seguridad son el control de la reactividad, la eliminación del calor del núcleo, el confinamiento de los materiales radiactivos y el blindaje contra las radiaciones; en el caso de las instalaciones del ciclo del combustible son el control de la subcriticidad y la química, la eliminación del calor de desintegración de los radionucleidos, el confinamiento de la radiactividad y el blindaje contra las radiaciones. El desarrollo de los INS deberá basarse en un análisis integrado del ciclo de vida útil, que tenga en cuenta los riesgos y las consecuencias del ciclo del combustible integrado.

La seguridad en la gestión de los desechos supone distintas escalas cronológicas y, en muchos casos, términos fuente y trayectorias diferentes a los de las instalaciones nucleares. Los nueve principios ya definidos por el OIEA para la gestión de los desechos radiactivos fueron adoptados por el INPRO sin modificaciones.

Como se espera que la demanda de electricidad crezca principalmente en los países en desarrollo, los miembros del INPRO considerarán que deberá prestarse particular atención a esos países. Para los países que sólo necesitan un pequeño número de centrales nucleares, no sería racional desarrollar toda una estructura nacional para el suministro. Compañías internacionales podrían proveer la mayor parte de la infraestructura necesaria para la construcción y explotación de los sistemas nucleoelectricos y prestar un valioso servicio.

La cooperación mundial: una necesidad

Existe un consenso general en el sentido de que deben llevarse a cabo actividades en el plano internacional para desarrollar nuevas tecnologías nucleares. Se ha analizado el establecimiento de algún tipo de cooperación entre los proyectos existentes y se ha avanzado en ese sentido.

Los objetivos tecnológicos del GIF y los requisitos para los usuarios del INPRO tienen muchos elementos similares o idénticos en lo que respecta a los factores económicos, la seguridad, el medio ambiente, el ciclo del combustible y los desechos, la resistencia a la proliferación, y la sostenibilidad. Los enfoques para la selección de los posibles conceptos innovadores también parecen ser bastante similares. No obstante, hay algunas diferencias significativas:

- ▶ El GIF ya se encuentra en la etapa de inicio de las actividades de I + D, mientras que el INPRO sólo acaba de concluir la formulación de los requisitos para los usuarios;
- ▶ El GIF aborda principalmente las necesidades de unos cuantos países industrializados, mientras que el INPRO examina con más profundidad la energía nucleoelectrica en general, teniendo en cuenta las necesidades específicas de los países y regiones;
- ▶ Se espera que el INPRO abarque una gama más amplia de propuestas tecnológicas para reactores y ciclos del combustible

nuclear innovadores, lo que satisfaría las demandas de casi todos los países y no únicamente de los que están directamente interesados en el sector de la energía nuclear.

- ▶ El INPRO también trata de abordar otras cuestiones, además de las necesidades tecnológicas, en particular, las posibles ventajas de la cooperación internacional con miras a crear la infraestructura necesaria para cada país, así como la introducción de innovaciones en las estructuras jurídicas e institucionales. En ese sentido, el INPRO está dispuesto a examinar las necesidades de los países en desarrollo.
- ▶ El GIF limita su examen a sistemas de energía nuclear independientes con diferentes tipos de reactores y sus ciclos del combustible.
- ▶ El INPRO considera que la combinación de esos sistemas debe adaptarse a distintos escenarios de desarrollo de la energía nucleoelectrica a escala nacional, regional y mundial.

Las bases del GIF y el INPRO permiten estrechar la cooperación, ya que el centro de sus actividades es diferente. Los miembros del GIF son, en su mayoría, los que poseen las tecnologías y el Foro examina tecnologías muy complejas. Sin embargo, el INPRO ve en Asia el futuro mercado para la energía nuclear, que incluye los países en desarrollo, donde se necesitan sistemas más sencillos pero fiables. El INPRO tiene entre sus miembros a países en desarrollo y por ello puede entender mejor sus necesidades.

En la Conferencia Internacional sobre tecnologías innovadoras relacionadas con el ciclo del combustible nuclear y la energía nucleoelectrica, celebrada por el OIEA en Viena, en junio de 2003, se subrayó que la innovación era un aspecto crucial para el futuro de la energía nuclear. El presidente de la Comisión de Energía Atómica de la India, Dr. Anil Kakodkar, hizo hincapié en la importancia de la energía nuclear como parte de la mezcla diversificada de energías. No obstante, manifestó que había un conflicto subyacente entre el mundo en desarrollo y el desarrollado en relación con la energía nucleoelectrica, pues muchos países en desarrollo creían que las medidas de no proliferación se habían utilizado en gran parte para impedir la transferencia válida de tecnología.

En la Conferencia General del Organismo, que tuvo lugar en septiembre de 2003, los Estados aprobaron una resolución que destaca la necesidad de la colaboración internacional en el desarrollo de tecnología nuclear innovadora y el gran potencial y los mayores beneficios que pueden reportar las actividades de colaboración. En la resolución también se destaca la importancia de determinar sinergias con otras iniciativas internacionales asociadas al desarrollo de tecnología nuclear innovadora.

Está claro que está evolucionando un enfoque multinacional más cooperativo, si bien quedan algunos obstáculos por salvar. Es posible que pronto comience la coordinación entre el INPRO y el GIF a medida que se desarrollan los acontecimientos.

Judith Perera tiene 15 años de experiencia como escritora, editora y consultora en materia de energía nuclear y esferas conexas. El presente artículo es una versión de un artículo suyo publicado en el número de enero de 2004 de Nuclear Engineering International. Correo electrónico: JudithPerera@aol.com. Véase más información sobre la labor que desarrolla el OIEA en el marco del INPRO en www.iaea.org/INPRO/