

DESARROLLO FUTURO DE REACTORES NUCLEARES Y CICLOS DEL COMBUSTIBLE NECESIDAD DE INNOVAR

POR D. MAJUMDAR, J. KUPITZ, H. ROGNER, T. SHEA, F. NIEHAUS Y K. FUKUDA

Parece inevitable que el desarrollo y el crecimiento demográfico mundiales puedan poner a prueba la habitabilidad de la Tierra según avance el siglo. Sobre todo, urge cada vez más cubrir las crecientes necesidades de electricidad y agua mediante formas que protejan el medio ambiente.

En los últimos 50 años, la energía nuclear dejó de ser un nuevo adelanto científico para convertirse en una fuente de energía importante de las diversas fuentes utilizadas en más de 30 países. Durante 1999, diecisiete países dependieron de la energía nucleoelectrica para satisfacer el 25%, o más, de sus necesidades de electricidad. Al mismo tiempo, cada vez más países muestran interés en desarrollar y demostrar las diversas aplicaciones de la energía nuclear, como, por ejemplo, el uso de reactores para la desalación del agua de mar.

Dadas estas circunstancias, cabría prever que se observara una tendencia ascendente en la generación de energía nucleoelectrica. Pero, ése no es el caso, y es incierta la futura contribución de la energía nucleoelectrica a la solución de los problemas que supone el desarrollo energético sostenible. El panorama mundial es diverso: no se están construyendo nuevas centrales nucleares en Europa occidental y América del Norte. Sin embargo, en varios países de Asia y en regiones de Europa oriental, la energía nucleoelectrica sigue creciendo.

Los principales factores de la diversidad de este panorama son las preocupaciones y percepciones erróneas relacionadas con tres tipos de problemas temáticos:

- la seguridad tecnológica y física;
- la vinculación entre la energía nucleoelectrica y las armas nucleares;
- los aspectos ambientales y económicos de la energía nucleoelectrica y su ciclo del combustible.

Para que la energía nucleoelectrica pueda contribuir de manera significativa a satisfacer la demanda de energía futura, deben solucionarse estos problemas temáticos. En realidad, la aceptación de la energía nucleoelectrica como opción energética futura dependerá del éxito con que se apliquen las soluciones a los problemas que se enfrentaron durante la implantación de la energía nuclear en el siglo XX.

Cada problema temático puede abordarse desplegando actividades en tres esferas interdependientes.

- **Tecnología.** Las características de la tecnología misma son, en gran medida, determinantes de

los aspectos clave de la seguridad tecnológica y física; de la no proliferación y de los factores ambientales y económicos.

- **Marco jurídico e institucional.**

Los contratos comerciales, las leyes, las regulaciones, los tratados y las convenciones intergubernamentales establecen las normas básicas que influyen en el desarrollo y la utilización de la energía nucleoelectrica.

- **Supervisión y controles.** Los controles que ejercen los propietarios y explotadores de las instalaciones nucleares, los gobiernos locales y nacionales, las organizaciones regionales e internacionales, así como grupos de ciudadanos interesados, sirven para velar por que se establezca y mantenga la estructura de supervisión requerida para las operaciones nucleares.

En cada una de estas tres esferas interdependientes se han adoptado y se seguirán adoptando diversas medidas; de hecho, en los últimos cincuenta años se creó una industria que ha utilizado provechosamente la energía nuclear, hasta el punto que, en la actualidad, ésta satisface la sexta

El Sr. Majumdar es un experto de los Estados Unidos de la Sección de Estudios Económicos y Planificación del Departamento de Energía Nuclear del OIEA, y el Sr. Rogner es Jefe de la Sección.

El Sr. Kupitz es Jefe de la Sección de Desarrollo de la Tecnología Nucleoelectrica del Departamento y el Sr. Fukuda es Jefe de la Sección del Ciclo del Combustible y de Materiales Nucleares del Departamento.

El Sr. Shea es Jefe de la Oficina de la Iniciativa Trilateral del Departamento de Salvaguardias del OIEA.

El Sr. Niehaus es Jefe de la Sección de Evaluación de la Seguridad del Departamento de Seguridad Nuclear del OIEA.

parte de las necesidades mundiales de electricidad. Ese logro es significativo.

No obstante, los problemas de hoy día son diferentes de los afrontados en los últimos decenios, y varían considerablemente según las regiones del mundo. Estos problemas son especialmente difíciles en los países en desarrollo que necesitan la electricidad para aliviar la carga de la pobreza y satisfacer las necesidades humanas básicas que plantea el desarrollo sostenible. Es preciso hacer más para ayudar a los países en desarrollo interesados en adoptar la opción nuclear para generar electricidad.

Entre los medios disponibles para encarar las dificultades inherentes a cada uno de los tres problemas temáticos, muy pocos pueden ser objeto de mejoras sencillas o a corto plazo. Ellos requerirán esfuerzos sostenidos durante mucho tiempo, y una cooperación que permita encontrar soluciones innovadoras convincentes respecto de las principales interrogantes, preocupaciones y percepciones erróneas.

Teniendo en cuenta la situación energética y las exigencias del desarrollo sostenible mundiales, el fortalecimiento de las bases que permitan ampliar la aportación potencial de la energía nucleoelectrica al suministro de electricidad debe ser un objetivo principal. Esas medidas pueden adoptarse en el marco de programas coherentes que aborden las tecnologías, los marcos jurídicos e institucionales y los sistemas de supervisión necesarios para obtener el apoyo político y del público.

A lo largo de su existencia, el OIEA ha contribuido de manera decisiva al establecimiento y a la coordinación de las actividades internacionales relacionadas con aplicaciones de la energía nuclear con fines pacíficos. En momentos en que la energía nucleoelectrica se encuentra en la encrucijada

de su desarrollo futuro, las actividades del Organismo en las esferas de la energía nucleoelectrica y del ciclo del combustible han cobrado más importancia. En el presente artículo se pasa revista a la situación mundial en el contexto de los grandes retos actuales y se analiza la necesidad de adoptar medidas coordinadas y a largo plazo, esenciales para asegurar progresos en el desarrollo de la energía nucleoelectrica en los inicios del siglo. A medida que se amplíe el mercado mundial de la energía, la energía nuclear podrá aumentar su aportación a la generación de electricidad, así como a usos finales no eléctricos de la energía, mediante la diversificación de las aplicaciones en diferentes campos.

LA SITUACION MUNDIAL

La contribución de la energía nuclear a los suministros de energía futuros depende de varios factores decisivos. El grado de compromiso mundial con las estrategias energéticas sostenibles y el reconocimiento del papel que desempeña la energía nuclear en las estrategias sostenibles repercutirán en su uso futuro. Una tecnología de eficacia comprobada, la competitividad económica, los acuerdos financieros y la aceptación del público, son otros factores clave que influyen en las decisiones de construir nuevas centrales. La percepción del público sobre las opciones energéticas y otras cuestiones ambientales conexas, así como la información al público y su educación, también desempeñarán una importante función. La continua vigilancia durante la explotación segura de las centrales actuales es otro factor importantísimo para preservar las posibilidades de la energía nucleoelectrica, a fin de contribuir a las estrategias energéticas futuras.

En esencia, para enfrentar los problemas relacionados con

la energía nucleoelectrica, es preciso realizar actividades de investigación y desarrollo en las esferas científica y técnica, no sólo para perfeccionar la actual tecnología de los reactores nucleares y del ciclo del combustible, sino también para desarrollar reactores y ciclos del combustible nuevos e innovadores, que sean resistentes a la proliferación, y logren mayor rendimiento con menos costo y márgenes elevados de seguridad.

Siete esferas temáticas. Las perspectivas mundiales de la energía nucleoelectrica pueden describirse atendiendo a los siete temas siguientes.

Tecnología. La tecnología nucleoelectrica ha venido desarrollándose durante cinco decenios. En los años sesenta, comenzaron a hacerse numerosos pedidos de centrales nucleares comerciales, y su explotación amplia con fines comerciales comenzó en el decenio de 1970. En la actualidad, la energía nucleoelectrica suministra alrededor del 6% al 7% de la energía primaria mundial. La mayoría de las centrales nucleares en explotación han tenido un buen comportamiento y siguen mejorándose.

Sin embargo, se han enfrentado problemas en varios campos y, en algunos casos, se procedió a la parada o la terminación prematuras de las centrales, pero éstas nunca funcionaron. Las construcciones iniciales alcanzaron su punto máximo en el decenio de 1970, y las conexiones a la red, en los años ochenta; en ambos casos, los niveles actuales son muy inferiores a los logrados anteriormente.

Hoy día, puede considerarse que las actividades relacionadas con el desarrollo de la tecnología de la industria de la energía nucleoelectrica tienen lugar en el marco de las tres categorías generales siguientes:

■ **Instalaciones comerciales** actualmente en explotación. Mejoras introducidas en el mantenimiento, las operaciones, el apoyo técnico, el suministro de combustible y la prolongación de la vida útil.

■ **Diseños evolutivos.** Mejoras logradas en el diseño y explotación para su implantación futura a cercano plazo, que entrañan cambios discretos respecto de las instalaciones comerciales actualmente en explotación.

■ **Diseños innovadores.** Avances logrados en el diseño y explotación, que entrañan cambios de envergadura respecto de las instalaciones comerciales actualmente en explotación, con vistas a su futura implantación a largo plazo.

En años recientes, en varios países, se ha generado un sinnúmero de ideas relacionadas con nuevos diseños de reactores de potencia y de ciclos del combustible. Algunos de esos diseños podrían rejuvenecer la energía nucleoelectrica, pero sólo si se desarrollan y se prueba su eficacia en condiciones que fomenten su éxito y conduzcan a la consecución de sus objetivos comerciales. El tiempo de ejecución de una innovación nuclear es largo. Se prevé que el desarrollo y las pruebas de un nuevo concepto de reactor nuclear requerirán entre 15 y 20 años, lo que dependerá del apoyo político permanente y la disponibilidad de suficientes recursos. Puede que transcurra mucho más tiempo para que pueda seleccionarse y probarse el candidato más prometedor que se convierta en el instrumento que permita la sustancial ampliación de la energía nucleoelectrica. Es preciso adoptar medidas energéticas para mantener y ampliar los necesarios conocimientos especializados adquiridos.

Seguridad. El elevado margen de seguridad nuclear actual se ha logrado mediante continuas mejoras, basadas en la

acumulación de experiencias a escala mundial. Las medidas de seguridad se han introducido, por lo general, atendiendo al criterio de que sean "razonablemente posibles", como se señala en *La seguridad de las instalaciones nucleares* de la Colección Seguridad del OIEA. Algunos países aplican el análisis costo-beneficio convencional para tomar decisiones sobre las mejoras. En caso de incertidumbre, deben adoptarse decisiones conservadoras. Dado el alto nivel de rendimiento actual y futuro del soporte físico (hardware), es preciso hacer hincapié en la gestión de la seguridad operacional.

Existe un amplio consenso internacional, que incluye a las autoridades reguladoras y a la industria, sobre las metas de seguridad en relación con los reactores futuros. El Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear (INSAG) las ha recomendado y requieren, básicamente, aumentar la seguridad de las futuras centrales nucleares en un factor de diez, en comparación con las metas fijadas para los reactores existentes (es decir, metas anuales de 10^{-5} para la frecuencia de daño en el núcleo y 10^{-6} para las grandes liberaciones radiactivas en el caso de las centrales futuras). En el INSAG-12 se afirma que "otro objetivo de las centrales nucleares futuras es la eliminación práctica de las secuencias de accidentes que podrían dar lugar a grandes liberaciones de radiactividad tempranas, mientras que durante el proceso de diseño se considerarían los accidentes graves que podrían entrañar fallos de contención tardíos, aplicando hipótesis realistas y el análisis de la estimación óptima, para que sus consecuencias sólo requieran medidas de protección limitadas en cuanto a superficie y tiempo".

Sin introducir cambios en la tecnología, esas mejoras aumentarían el costo de la energía

nucleoelectrica, tanto en gastos de capital como en gastos de explotación. Por ende, el reto en relación con el desarrollo y la demostración de las centrales futuras está en cómo aumentar la seguridad hasta esos ambiciosos niveles, y reducir al mismo tiempo los costos para poder competir en el mercado de la energía.

Lógicamente, no se trata, en principio, de un imposible. El aumento simultáneo de la seguridad operacional y del rendimiento económico de la tecnología ha sido siempre una de las principales fuerzas propulsoras de la inventiva y la innovación técnicas.

En los diseños evolutivos se estudian las formas de aumentar la seguridad que, en lo referente al soporte físico, incluye el uso de tecnología de control moderna, la simplificación de los sistemas de seguridad, el empleo de diseños avanzados y la ampliación de los plazos de respuesta requeridos para hacer funcionar los sistemas de seguridad y la acción del explotador. Respecto del soporte lógico (software), con esas soluciones puede aliviarse la carga de tener que demostrar el cumplimiento de los requisitos. Asimismo, el aumento de los conocimientos técnicos y el perfeccionamiento de los códigos de computadoras contribuyen a que las operaciones sean seguras. Otro aspecto es la "adopción de decisiones racionales sobre los riesgos", con objeto de centrar las actividades en cuestiones de seguridad importantes; ello podría traducirse en el establecimiento de requisitos más estrictos, en algunos casos, y más flexibles, en otros. También se presta atención a la simplificación del proceso de concesión de licencias y al aumento de su previsibilidad.

En los diseños innovadores se hace un uso aún mayor de las características que aumentan la seguridad inherente. Los diseños tratan de demostrar, en particular, que los diseños avanzados o las

nuevas características pueden obviar la necesidad de usar determinados sistemas de seguridad que los reactores actuales requieren; estos sistemas no se necesitarían en lo absoluto o sólo se necesitarían para proteger las inversiones de la central, y no la salud ni la seguridad del público. En ese caso, el equipo podría incluso estar instalado; pero no tendría que cumplir las funciones esenciales de seguridad, lo que hoy día aumenta su costo significativamente. Esos diseños también reducirían sensiblemente los esfuerzos necesarios para formular medidas de gestión de accidentes y adoptar medidas de preparación para emergencias.

Seguridad física. Medidas de protección adecuadas y un marco internacional sólido son indispensables para impedir la posesión no autorizada de materiales nucleares y otros materiales radiactivos peligrosos, y prevenir la destrucción deliberada de instalaciones nucleares o la dispersión intencional de esos materiales durante su transporte.

Gestión del combustible gastado y de los desechos radiactivos. Este tema sigue preocupando al público. El déficit de capacidad para el almacenamiento del combustible gastado es un gran problema en varios países. Al mismo tiempo, el combustible gastado tendrá que ser almacenado durante más tiempo en el mismo emplazamiento, debido a la falta de una instalación de disposición final. Como no se ha podido demostrar la posibilidad de instalación permanente para la disposición final, las preocupaciones se han multiplicado, y creado incertidumbres respecto de la explotación futura, reduciendo aún más el apoyo del público, la disposición política y la viabilidad financiera. Los conceptos innovadores de los ciclos del combustible nuclear que entrañan nuevas tecnologías pueden ayudar a mitigar la carga ambiental reduciendo el volumen y la toxicidad de los dese-

chos nucleares para aumentar la seguridad, la resistencia a la proliferación y la rentabilidad de la energía nucleoelectrica.

No proliferación. La posibilidad de un vínculo potencial entre la energía nucleoelectrica y las armas nucleares es fundamental para el régimen internacional de no proliferación y constituye la base de las salvaguardias del OIEA. Se sabe que quince Estados han creado métodos de enriquecimiento del uranio y, aunque hoy en día el reprocesamiento químico se realiza en un solo Estado que no posee armas nucleares, persiste la preocupación de que las operaciones nucleoelectricas actuales y futuras podrían fomentar y proporcionar tecnologías esenciales relacionadas con la adquisición de armas nucleares.

A raíz de los sucesos ocurridos en el Iraq y la República Popular Democrática de Corea, el régimen de no proliferación internacional se ha ampliado y fortalecido, e incluye la disposición de los Estados a abstenerse de ayudar a los proliferadores potenciales a adquirir tecnologías y conocimientos especializados clave, el control sobre los proveedores de materiales, instalaciones y equipo delicados y el fortalecimiento de las salvaguardias del OIEA, sobre todo en relación con la capacidad de esos Estados para detectar operaciones de enriquecimiento y reprocesamiento no declaradas. Todo Estado que actualmente emprenda un programa que esté dirigido a adquirir armas nucleares encontraría obstáculos mucho mayores contra la ayuda internacional, tendría muchas más posibilidades de ser detectado antes de que ese programa pudiera tener éxito, y existirían más probabilidades de que se adopten medidas concertadas contra la proliferación, en caso de que se revelara dicho programa.

Economía. La tendencia mundial a la supresión de

reglamentaciones y al aumento de la competencia en la generación de electricidad --junto con el mantenimiento de los precios bajos de los combustibles fósiles y el suministro excesivo de la capacidad de generación de la carga básica en los países desarrollados-- ha afectado la ampliación de las centrales nucleares. Aunque la mayoría de las existentes son rentables, se están haciendo muy pocos pedidos de nuevas centrales.

En muchas regiones del mundo, la disponibilidad de gas natural barato y avances decisivos en materia de tecnología de turbinas de gas, así como los progresos realizados en las tecnologías del carbón, han restado atractivo económico a las centrales nucleares nuevas en países que no tienen fácil acceso al gas natural ni al carbón, o que asignan gran importancia a la seguridad energética.

Los estudios realizados por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), así como en los Estados Unidos y el OIEA, han demostrado que debido a la elevada rentabilidad y los correspondientes períodos de reembolso cortos que suelen preverse hoy, las centrales nucleares nuevas tendrán dificultades para ser competitivas en regiones que tienen fácil acceso al gas, o reservas nacionales de carbón. Los elevados gastos de capital iniciales y los relativamente largos plazos de construcción, han neutralizado con creces la ventaja de los costos del combustible nuclear. Actualmente pueden construirse algunos sistemas de gas natural con un costo de capital mucho menor que el de una central nuclear equivalente y en un plazo de menos de la tercera parte. Por tanto, se prevé que, a cercano plazo, la capacidad de energía nucleoelectrica crecerá solamente en el limitado número

de países que carecen de recursos energéticos autóctonos o infraestructuras de gas natural.

Aceptación política y del público. Si bien los reactores nucleares de potencia existentes funcionan en condiciones fiables y seguras, surgen preocupaciones y se tienen percepciones erróneas cuando la seguridad depende de complejos sistemas técnicos y de los conocimientos del personal que los opera. Pese a la elaboración de diseños evolutivos, cuyas características de seguridad han sido mejoradas respecto de las centrales existentes, en muchos países ha disminuido el apoyo a la energía nucleoelectrónica. Es preciso desplegar mayores esfuerzos para comunicar, de manera más eficaz, los progresos que se están haciendo y fomentar la comprensión del público en cuanto a la energía nucleoelectrónica en el contexto de la demanda mundial de energía, los sistemas energéticos comparativos y los entornos regulatorios y tecnológicos en que funcionan los sistemas de generación de electricidad.

NECESIDAD DE INNOVAR

A más largo plazo, la situación del mercado energético mundial sigue siendo incierta. No obstante, en numerosos análisis, incluida la reciente Declaración del Consejo Mundial de Energía, se apoya energéticamente la necesidad de mantener la energía nucleoelectrónica como opción. (Véase el artículo conexo de la página 2.) El continuo crecimiento demográfico y de la demanda de energía, sobre todo en los países en desarrollo, junto con el aumento de la experiencia y los conocimientos sobre el fenómeno del cambio climático mundial, subrayan la necesidad a nivel mundial de establecer acelerada y ampliamente centrales alimentadas con combustible no fósil para generar electricidad.

En marzo de 2000, el Grupo Intergubernamental de Expertos

sobre el cambio climático (IPCC) aprobó un informe especial sobre escenarios de emisión (SRES) para el período que termina en el año 2100. Esos escenarios prevén una gran demanda de tecnologías energéticas libres de carbono en el período posterior a 2020.

Las proyecciones de la implantación de la energía nuclear son, por lo general, bastante amplias. En los escenarios se prevé una participación de la energía nuclear variable, pero se señalan, invariablemente, grandes posibilidades de que la energía nuclear crezca, de los 350 GWe actuales a entre 2000 GWe y 5000 GWe en 2050, y de 3500 GWe a 10 600 GWe en 2100. (Véase el artículo conexo de la página 31.) En esencia, el nivel de la capacidad para 2050 en esos escenarios se traduce en aumentos de la capacidad de energía nucleoelectrónica mundial de 50 GWe a 150 GWe anuales desde 2020 hasta 2050.

Teniendo en cuenta los retos ya mencionados, es difícil prever que la capacidad de la energía nuclear se multiplique por cinco o por diez sobre la base únicamente de las tecnologías evolutivas existentes. Es preciso llevar a cabo actividades de I+D innovadoras, que garanticen la plena participación de la energía nucleoelectrónica en el mercado energético mundial del futuro. Examinemos los aspectos siguientes:

■ **Costo.** Es necesario aumentar la competitividad nuclear en un mercado energético sin reglamentaciones, sobre todo en regiones que tienen fácil acceso al gas y/o a pequeñas redes de distribución locales, y para aplicaciones nucleares no eléctricas.

■ **Compatibilidad de la infraestructura.** De acuerdo con las proyecciones, el futuro aumento de la demanda de electricidad tendrá lugar mayormente en países que no están muy familiarizados con la energía nucleoelectrónica. No todos ellos pueden desarrollar con

rapidez la infraestructura necesaria para la explotación de reactores y los servicios de la etapa inicial y de la parte final del ciclo del combustible nuclear. Asimismo, en el plano local, el examen de la seguridad y los requisitos para la concesión de licencias con vistas a la construcción y explotación de las centrales, deben ser viables a un costo razonable.

■ **Seguridad.** Gracias a las actividades de investigación y desarrollo en curso, se aumenta aún más la seguridad de los reactores futuros. Uno de los objetivos es la conveniente eliminación de las secuencias de accidentes que podrían provocar grandes emisiones de radiactividad tempranas. A fin de reducir los costos, ello requiere soluciones innovadoras que aumenten la seguridad simplificando los sistemas y haciendo un mejor uso de los diseños y las características de seguridad avanzadas.

■ **Salvaguardias.** El gran aumento del número de centrales nucleares en el mundo y el consiguiente incremento de la cantidad de plutonio en el combustible gastado, son motivos de preocupación en relación con las salvaguardias del OIEA. Sin embargo, más aún lo serían la propagación del enriquecimiento del uranio crítico y las tecnologías de extracción de plutonio.

Los costos de las inspecciones requeridas para tener suficientes garantías de seguridad de que los Estados siguen cumpliendo sus compromisos de no proliferación, varían mucho según la tecnología empleada: si la línea de base es un reactor de agua ligera, los trabajos de inspección de un reactor de potencia en servicio son aproximadamente cinco veces mayores, los de una planta de enriquecimiento de uranio diez veces mayores y los de una planta de reprocesamiento químico 100 veces mayores.

En los diseños de los reactores y en los ciclos del combustible

TECNOLOGÍAS INNOVADORAS RELACIONADAS CON EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Atributo	Proceso y sistema	Países interesados	Características
Composición y Proceso del combustible	Piroproceso	Japón, Rusia, EE.UU	El volumen de desechos nucleares es menor y la instalación de procesamiento es más sencilla que para el proceso en condiciones de humedad (se prevén ventajas económicas y ambientales).
	Combustible vibrocompactado	Rusia, Suiza	La partícula combustible se produce directamente a partir de una solución ácida derivada del reprocesamiento (se prevén ventajas económicas en comparación con la tecnología a base de polvo).
	Sistema DUPIC	Canadá, República de Corea	El plutonio no se separa del combustible gastado del PWR (se prevé resistencia a la proliferación)
	Combustible de torio (torio-uranio, torio-plutonio)	India, EE.UU.	El recurso de torio es abundante. El combustible con composición de torio-uranio genera menos actínidos inferiores (MA) que el combustible de uranio-plutonio.
	Combustible de matriz inerte	Francia, Japón, Suiza	Debido al óxido químicamente estable, el combustible gastado se considera como una forma de desecho (mitigación ambiental).
Sistema de partición y transmutación (P-T)	Sistema acondicionado por aceleradores	Francia, Japón, EE.UU.	Los neutrones de alta energía producidos destruyen los MA, los productos de fisión de período largo (LLFP). El núcleo subcrítico aumenta la seguridad.
	Sistema de P-T con reactor rápido (FR)	Japón, Rusia	La tecnología de FR actual se aplica para destruir los MA y los LLFP.
Sistema de reactor	Reactor rápido de plomo (+bismuto)	Rusia	La seguridad aumenta con el uso del refrigerante de plomo.

deben procurarse innovaciones que permitan ampliar sustancialmente la energía nucleoelectrica, y, al mismo tiempo, reducir al mínimo el acceso a los materiales nucleares en formas de fácil empleo en armas nucleares u otros dispositivos explosivos nucleares, y a las tecnologías que propician su producción.

■ Disponibilidad de recursos.

A la larga, los recursos de uranio convencionales pueden llegar a ser demasiado costosos para respaldar un gran aumento de la energía nucleoelectrica mundial sólo sobre la base de los reactores térmicos tradicionales. Para estimar

y satisfacer las necesidades futuras debe elaborarse un plan amplio.

Esas son las principales razones que explican la necesidad de trabajar en diseños de reactores y ciclos del combustible innovadores, así como en los reactores evolutivos.

ACTIVIDADES DE I+D INNOVADORAS

Diseños de reactores innovadores.

En la actualidad, el 40% de las centrales nucleares en construcción (23% de toda la capacidad en construcción), principalmente en los países en desarrollo, se clasifican en pequeñas (menos de 300 MWe)

y medianas (menos de 700 MWe). Esas centrales incorporan las tecnologías básicas de las centrales nucleares actuales de gran tamaño. Los reactores evolutivos más pequeños (como el AP-600, el VVER-640, el PHWR-500 y el CANDU-6) también se basan en las centrales existentes.

Empero, la industria nuclear y los países que creen en los beneficios generales, la viabilidad y la importancia de la energía nucleoelectrica a largo plazo han reconocido la necesidad de una labor innovadora de I+D. Hoy día, se lleva a cabo una importante labor de I+D en materia de conceptos innovadores de

REACTORES NUCLEARES PEQUEÑOS Y MEDIANOS EN DESARROLLO A ESCALA MUNDIAL

En varios países, se diseñan y desarrollan reactores nucleares pequeños :

- **Carem-25**, reactor de agua a presión de 25 MWe, en desarrollo en la Argentina. Este reactor se diseña con un generador de vapor integral que podría acoplarse al proceso de desalación.
- **KLT-40**, reactor de agua a presión de 40 MWe, en desarrollo en la Federación de Rusia. El diseño de este reactor es una versión, montada en una barcaza, de un reactor pequeño que se utiliza en los rompehielos para la generación de electricidad y de calor en la región septentrional de Siberia.
- **PBMR**, reactor de alta temperatura de 114 MWe, en desarrollo en Sudáfrica. Este reactor modular de lecho de bolas refrigerado por gas se desarrolla con un ciclo abierto del combustible y características de seguridad avanzadas, debido al uso de partículas combustibles revestidas de cerámica con alta capacidad calorífica.
- **SMART**, reactor de agua a presión de 100 MWe, en desarrollo en la República de Corea. El diseño conceptual de este reactor está casi terminado y tiene un generador de vapor integral para aplicaciones múltiples, incluida la desalación del agua de mar.
- **NHR-200**, reactor de agua a presión de 200 MWt, en desarrollo en China, donde también se proyecta, para 2001, la criticidad inicial de un reactor pequeño de alta temperatura, de 10 MWt, para aplicaciones no eléctricas.
- **AHWR**, reactor de agua pesada de 235 MWe, en desarrollo en la India. Es un reactor avanzado de tubo vertical que utilizaría combustible con base de torio e incorporaría características refrigerantes pasivas.
- **GT-MHR**, reactor refrigerado por gas de 285 MWe, en desarrollo mediante actividades conjuntas de Estados Unidos, Federación de Rusia, Francia y Japón.

reactores y del ciclo del combustible nuclear en varios países, incluidos la Argentina, Canadá, China, Estados Unidos, Francia, India, Italia, Japón, República de Corea, Rusia y Sudáfrica. (Véanse el cuadro y el recuadro)

La atención se ha centrado en el desarrollo de reactores pequeños y medianos, que tienen diversas combinaciones de relativa simplicidad de diseño, economía de producción en gran escala, reducción de los costos de selección del emplazamiento, núcleos de período largo, telemando prácticamente automático, mantenimiento centralizado y servicios de reabastecimiento de combustible. Rusia ha realizado demostraciones

de la explotación comercial de reactores pequeños para la generación de calor y electricidad en zonas distantes. En 1999, los Estados Unidos tuvieron la iniciativa de realizar investigaciones en materia de energía nuclear para elaborar conceptos avanzados de reactores y del ciclo del combustible, y de hacer grandes avances científicos en la tecnología nuclear para vencer los obstáculos al crecimiento del uso de la energía nuclear.

En muchos países se estudian diseños innovadores para desarrollar unidades más pequeñas, que requieren plazos de construcción más cortos y menores gastos de capital. La finalidad de estos estudios es crear

un diseño económico con mejores características de seguridad y de resistencia a la proliferación. No son meras versiones reducidas de diseños antiguos. La construcción en el emplazamiento con estructuras y componentes de fabricación industrial, incluidas las unidades modulares completas para la instalación acelerada son algunas de las características deseadas en estos reactores. Asimismo, se espera que estas unidades sean más fáciles de financiar y adecuadas para implantar, incluso en regiones con modestas redes de distribución de electricidad.

Desde la perspectiva de la innovación, cabe mencionar dos tecnologías de reactores avanzados no refrigerados por agua: los reactores de gas a alta temperatura de ciclo directo y los reactores rápidos enfriados por plomo/plomo-bismuto. El reactor modular de lecho de bolas refrigerado por helio (PBMR), de 114 MWe, de Sudáfrica, ha sido objeto de la atención mundial porque, según se afirma, tiene las características deseadas (incluida la competitividad en el mercado). Los rusos también han hecho afirmaciones similares en cuanto a su reactor rápido enfriado por plomo, aunque es de mayor tamaño.

Todos esos reactores ofrecen perspectivas alentadoras de mitigar algunas preocupaciones respecto del desarrollo de la energía nucleoelectrica. Seleccionar los que ofrezcan las mejores posibilidades para el desarrollo y la demostración en el futuro será importante.

Ciclos del combustible nuclear innovadores. Desde que el desarrollo de la energía nucleoelectrica se inició en los años sesenta, el proyecto del ciclo del combustible cerrado con reactores reproductores se consideró la mejor opción para la implantación de la energía nuclear en gran escala. Sin embargo, en la actualidad es necesario innovar

para afrontar una serie de problemas derivados de la no proliferación, la mitigación ambiental, la economía y la necesidad de aumentar la seguridad tecnológica y física.

Las características de los ciclos del combustible nuclear innovadores previstos pueden definirse en relación con diversos objetivos:

- La competitividad económica de los ciclos del combustible.
- La reducción al mínimo de los desechos radiactivos.
- La promoción de los objetivos de la no proliferación, a saber, que los materiales nucleares no puedan adquirirse ni transferirse con facilidad para fines no pacíficos.
- El aumento adicional de la seguridad mediante procesos tecnológicos.

Aunque en la actualidad no se ejecutan programas en gran escala relacionados con los ciclos del combustible nuclear innovadores, muchos países que tienen programas nucleoelectrónicos realizan investigaciones sobre esos ciclos.

Por otra parte, parece que todos esos conceptos de ciclos del combustible dan la esperanza de aliviar, al menos, algunas preocupaciones relacionadas con el desarrollo nuclear. Será preciso garantizar el cumplimiento de los objetivos generales del perfeccionamiento de la energía nucleoelectrónica, y, en última instancia, concentrarse en los ciclos del combustible que eliminen o mitiguen en la mayor medida posible las reocupaciones.

Si bien los actuales programas de I + D innovadores tienen algunos objetivos comunes, sus enfoques y objetivos específicos difieren. Como resultado existe una amplia variedad de conceptos de reactores y de ciclos del combustible. En algunos programas se analizan con una nueva perspectiva conceptos antiguos cuando las mejoras en cuanto a materiales y otras tecnologías los hacen hoy viables.

En otros, se trata de introducir sistemas innovadores en sustitución de otros más convencionales, a fin de lograr mejoras considerables.

No obstante, en otros se ha decidido estudiar opciones completamente nuevas.

Las actividades de I+D innovadoras abarcan hoy prácticamente todos los principales tipos de ciclos del combustible nuclear y de centrales nucleares --reactores de agua ligera, reactores de agua pesada, reactores refrigerados por gas y reactores de metal líquido-- y también se estudian otros tipos. Un análisis mundial de las actividades de I+D innovadoras indica que existen entre 40 y 50 conceptos diferentes en desarrollo. Algunos se encuentran en las fases iniciales de diseño conceptual, otros están más avanzados, en la fase de diseño básico, y en unos cuantos se procede a la construcción de prototipos o unidades de demostración.

Asimismo, en esferas fundamentales como la seguridad, la gestión de desechos, la no proliferación, el consumo de recursos y los tipos de aplicaciones de la energía existe una mayor diversidad de requisitos. Por ejemplo, en la esfera económica, aunque todos los conceptos tratan de ser competitivos en el mercado energético del futuro, hay diferentes opiniones en cuanto a si deben llegar a ser competitivos o no teniendo en cuenta la introducción potencial de impuestos sobre las emisiones de CO₂ y los aumentos de los precios del combustible fósil. En vista de esas incertidumbres, la energía nucleoelectrónica debe aspirar a ocupar el lugar que le corresponde.

En la esfera de la seguridad, algunos creen que los actuales reactores de agua ligera avanzados son suficientemente seguros para desarrollarlos en gran escala, porque permiten adoptar el

enfoque del buen vecino (ninguna emisión de radiactividad considerable fuera del emplazamiento, ni siquiera en caso de un accidente grave). Otros insisten en que el público aceptará la implantación de la energía nuclear en gran escala, sólo si se presenta un nuevo tipo de reactor sin fallos del combustible significativos, como a veces se alega respecto de reactores modulares de alta temperatura.

En la esfera de la gestión de desechos, algunos opinan que la disposición final subterránea directa del combustible gastado es una opción suficientemente segura y que para garantizar la aceptación del público, sólo se requiere su demostración práctica. Otros insisten en que es necesario eliminar nucleidos nucleares peligrosos de período largo, mediante el quemado o la transmutación para aumentar el apoyo del público a la implantación de la energía nuclear en gran escala. Existen diferentes opiniones acerca de cuáles elementos peligrosos deberán eliminarse, y en qué grado. La posibilidad de recuperar el combustible gastado constituye igualmente otro problema.

En la esfera de la no proliferación, algunos proponen elaborar conceptos especiales de reactores y ciclos del combustible "resistentes a la proliferación" (nuevos tipos de combustible, nuevas tecnologías de reprocesamiento sin la extracción de plutonio, nuevos conceptos de reactores rápidos y otros), con mayor dependencia de las características técnicas intrínsecas para el caso de desviación de materiales nucleares. Empero, los investigadores no han llegado a un consenso en cuanto a cómo medir el grado de "resistencia a la proliferación" y hasta qué punto debemos aumentar nuestra dependencia de las medidas técnicas.

La comunidad nuclear debe encontrar la forma de reducir la

multiplicidad de opciones y centrarse en las pocas que ofrecen más perspectivas de poderse desarrollar con éxito.

NECESIDAD DE COOPERACION INTERNACIONAL

Ante el limitado apoyo de los gobiernos a las actividades de I+D y la amplia diversidad de diseños conceptuales, es indispensable que el crucial período de 10 a 15 años próximo se dedique a la producción de reactores y ciclos del combustible nucleares prácticos que tengan éxito en el mercado. En particular, las metas demasiado ambiciosas en cuanto a la gestión de desechos, la seguridad o la no proliferación, pueden traducirse en aumentos excesivos del costo de la energía nuclear, reduciendo la competitividad de la opción nuclear.

Mientras se desarrollen las innovaciones tecnológicas, también será esencial examinar y revisar los mecanismos comerciales, gubernamentales e intergubernamentales de conformidad con los progresos que se realicen.

Esas cuestiones son importantes para la reactivación a largo plazo de la energía nucleoelectrica y deben abordarse cuanto antes. Una de las formas de avanzar y lograr un consenso respecto de algunas de esas cuestiones es la colaboración internacional y la coordinación de las actividades de I+D en el plano mundial. La cooperación internacional entre centros de investigación estatales, organizaciones internacionales, como el OIEA, la AEN y la Comisión Europea, y la industria nuclear puede acelerar el progreso, aunando recursos para la consecución del objetivo común. Por ejemplo, grupos como esos pueden proponerse las tareas siguientes como actividades conjuntas:

- La evaluación de las necesidades de las futuras instalaciones y del papel de la energía nucleoelectrica en diferentes mercados;
- La creación de un conjunto de características previstas en materia de seguridad tecnológica y física, gestión de desechos, no proliferación y consumo de recursos para las nuevas tecnologías de reactores y del ciclo del combustible;
- La cooperación internacional en el desarrollo de los conceptos más prometedores.

Esas tareas son importantes para garantizar que los países puedan beneficiarse de la tecnología de la energía nucleoelectrica como opción para el suministro energético sostenible a largo plazo.

Actividades del OIEA. El Organismo ha establecido desde hace mucho tiempo programas destinados a ayudar a los países en esferas relacionadas con el desarrollo de la energía nucleoelectrica y el ciclo del combustible. Las actividades ahora están dirigidas a mejorar la coordinación de las actividades y a definir objetivos comunes de conformidad con los intereses de los Estados Miembros del Organismo. El nuevo programa orientado al logro de resultados y el nuevo enfoque presupuestario del OIEA pueden contribuir a integrar todas sus actividades en un programa de reactores y ciclos del combustible innovadores para abordar mejor los principales problemas que enfrentan los países en relación con el desarrollo energético y nucleoelectrico. En este marco, puede evaluarse el desarrollo a escala mundial de reactores y ciclos del combustible innovadores.

Como se señala en la Estrategia de Mediano Plazo del Organismo, uno de los objetivos primordiales de las actividades es apoyar y facilitar el intercambio de información y el desarrollo de las

aplicaciones de las tecnologías nucleares nuevas. Ello puede lograrse propiciando y estimulando la creación de un foro que examine los progresos asociados a las nuevas tecnologías nucleoelectricas y del ciclo del combustible, comprendidos los reactores de pequeña y mediana potencia para generar electricidad y producir calor, incluida la desalación del agua de mar; los nuevos adelantos tecnológicos relacionados con la competitividad, la seguridad y el rendimiento; el aumento de la resistencia a la proliferación en los reactores y los ciclos del combustible conexos; y la reducción de la generación de desechos radiactivos. Entre los tipos específicos de actividades que se estudian figura servir de foro central para los Estados Miembros que desean trabajar en conceptos de diseño similares. Ello coadyuvaría esencialmente a aunar recursos y conocimientos especializados para el desarrollo de reactores y ciclos del combustible innovadores.

En la actualidad, la energía nucleoelectrica se encuentra en un momento decisivo, sin que se haya llegado a consenso sobre su función futura. Si bien tiene un reconocido historial en cuanto a ayudar a los países a satisfacer sus necesidades energéticas --y tiene ventajas comparativas sobre otras opciones de generación de electricidad en el marco del desarrollo energético sostenible--, un problema fundamental es lograr una mayor comprensión y aceptación política y del público de su contribución potencial. Gracias a las nuevas iniciativas y acciones integradas emprendidas para fortalecer la cooperación nuclear internacional, el OIEA está elaborando un programa más coherente que responda mejor a los intereses de los Estados Miembros de desarrollar la opción nucleoelectrica y demostrar que es un elemento vital para el futuro energético del mundo. □