

Reactores avanzados: consideraciones ambientales y de seguridad

Perspectiva internacional de la próxima generación de centrales nucleares

por L. Kabanov,
J. Kupitz y
C.A. Goetzmann

En todo el proceso de desarrollo de las aplicaciones civiles de la energía nuclear se ha asignado una importancia primordial al logro —y el mantenimiento— de un elevado nivel de seguridad. Se ha tratado de alcanzar los objetivos de seguridad no sólo mediante diseños prudentes respaldados por una amplia labor experimental y un trabajo analítico de investigación y desarrollo, sino también mediante controles y prácticas destinados a velar por la calidad en la fabricación de los componentes y en la construcción, explotación, mantenimiento y gestión de las centrales.

En los últimos 30 años, las centrales nucleares civiles han acumulado más de 5600 años-reactor de experiencia en la generación de electricidad en todo el mundo, y si bien han ocurrido dos grandes accidentes, sólo uno tuvo consecuencias graves fuera del emplazamiento. En conjunto, las centrales nucleares de todo el mundo han alcanzado por término general un nivel de seguridad muy satisfactorio.

Cabe esperar que las centrales nucleares avanzadas igualen o superen las características de seguridad de las mejores centrales que se encuentran en explotación actualmente. La fuerza impulsora es, en gran medida, la "cultura de la seguridad", cuyo establecimiento se ha convertido en un requisito previo para la introducción de la energía nucleoelectrónica en cualquier país. Este término se refiere básicamente a la búsqueda continua de un nivel de excelencia en todo el sistema, incluidas la infraestructura técnica y la gestión asociadas tanto al diseño como a la construcción y a la explotación de las centrales nucleares.

Al aprovechar al máximo los trabajos de investigación y la experiencia acumulada en la explotación de más de 400 centrales nucleares de todo el mundo, esta labor se ha convertido en un importante móvil del progreso tecnológico. Una notable consecuencia de este método evolutivo es que no pone en duda la seguridad operacional de la mayor parte de las centrales nucleares de la actual generación, sino que la toma como punto de partida.

El Sr. Kabanov y el Sr. Kupitz son altos funcionarios del Departamento de Energía y Seguridad Nucleares del OIEA. El Sr. Goetzmann es un experto gratuito del Departamento.

Surge un consenso sobre los principios de seguridad

Las actividades relativas a la seguridad destinadas a respaldar el desarrollo de la próxima generación de centrales nucleares están atrayendo cada vez más el interés de la comunidad internacional.

En septiembre de 1991, los participantes en la Conferencia Internacional sobre seguridad nuclear del OIEA recomendaron que el Organismo tomara algunas medidas. Específicamente, la Conferencia instó al OIEA a que apoyara la labor de sus Estados Miembros encaminada al logro de un consenso internacional sobre objetivos de seguridad para las generaciones futuras de centrales nucleares, y a la elaboración de principios y características de seguridad apropiados. Se propuso un método gradual que condujera a un conjunto integral de criterios de seguridad, al cual podrían hacer una importante contribución los documentos del Grupo Internacional Asesor de Seguridad Nuclear (GIASN).

Entre otros objetivos figura el de mejorar los niveles de seguridad de la próxima generación de centrales nucleares, de modo que el riesgo de grandes escapes accidentales de radiactividad al medio ambiente sea aún más insignificante que en la actualidad. El principio de larga data de defensa en profundidad sigue siendo el medio fundamental de garantizar la seguridad. Su aplicación entraña el uso de niveles sucesivos de protección, incluidas barreras físicas independientes para impedir el escape de radiactividad al medio ambiente, así como redundancias y separación espacial para la protección contra fallos en etapas sucesivas. Las cuatro barreras consisten básicamente en la matriz del combustible, las vainas del combustible, la frontera primaria de refrigeración, y la estructura de contención.

En la actualidad los diseñadores nucleares están esforzándose por mejorar las propias barreras y el nivel de protección que cada una brinda a fin de mejorar el nivel general de seguridad. Sin embargo, para lograr este objetivo no es necesario dar a cada barrera y al nivel de protección asociado igual importancia. Es evidente que el mejoramiento de la primera barrera aligera la carga de las subsiguientes, lo que también ocurre al mejorar la segunda, y así sucesivamente. Además, el hecho de dar más priori-

dad a las primeras barreras brindará mayores garantías en cuanto a preservar la inversión de la central y mantener el material radiactivo más cerca del lugar donde se genera.

Aunque todos los diseños brindan protección en todas las etapas, el grado de esa protección varía entre los diferentes conceptos. Los diseños evolutivos se han sometido a un examen crítico y se les ha introducido mejoras en las cuatro barreras. En los diseños innovadores también se han examinado las cuatro barreras, pero en algunos casos se ha hecho más hincapié en la segunda barrera, o sea, en prevenir fallos en las vainas del combustible. El interés de los propietarios por proteger sus inversiones y limitar el escape de productos de fisión pone de relieve la prevención de accidentes, lo que a su vez tiende también a dar mayor importancia a las primeras barreras.

El desarrollo adquiere un alcance internacional

Si se realizara un estudio se podrían identificar fácilmente más de 40 conceptos de centrales nucleares en diversas fases de desarrollo en todo el mundo, lo que constituye un impresionante testimonio de la convicción de que la energía nucleoelectrónica tiene futuro. (Véase el cuadro.) Dada esta gran cantidad de conceptos, en el presente artículo sólo se abordarán algunas tendencias generales.

Tanto por la fase de madurez en que se encuentran como por la base de experiencia acumulada, los diseños evolutivos que dominan el espectro son los de grandes reactores refrigerados por agua, seguidos por centrales del mismo tipo pero de mediano tamaño, en las cuales se destacan características pasivas destinadas a aumentar la resistencia a los accidentes. Un tercer grupo, comúnmente conocido como diseños innovadores, abarca reactores de agua mucho más modificados pero aún más pequeños, y reactores de alta temperatura refrigerados por gas, así como reactores refrigerados por metal líquido.

Se observa una tendencia a fortalecer la cooperación internacional en el desarrollo de reactores avanzados, por ejemplo:

- los Estados Unidos de América cooperan con el Japón y Corea en el desarrollo de reactores avanzados refrigerados con agua ligera (ALWR);
- el Canadá coopera con la República de Corea en el desarrollo de reactores moderados y refrigerados con agua pesada a presión (PHWR);
- Francia y Alemania lo hacen en Europa respecto de los ALWR; y
- los países europeos, en el desarrollo de reactores reproductores rápidos.

Estos ejemplos no son exhaustivos, por cuanto otros países, como la Federación de Rusia, también están trabajando para lograr una mayor cooperación internacional.

Pese a la gran variedad de conceptos que están siendo objeto de examen y al gran número de instituciones de diseño, en última instancia los objetivos son pocos y precisos, a saber, mantener y mejorar los aspectos económicos y la seguridad de la energía nucleoelectrónica. Parece haber un acuerdo general respecto de que se deberían ampliar los principios básicos de seguridad para las centrales nucleares emitidos por el GIASN, que se basan en la experiencia de explotación, ya que el Grupo ha propuesto incluir los siguientes aspectos concretos para las futuras centrales nucleares:

- procedimientos de explotación y mantenimiento;
- diseños simplificados, menos complejos para el usuario;
- diseño para el confinamiento sistemático de los productos de fisión en condiciones de accidentes graves;
- reducción de la probabilidad de accidentes graves y de sus posibles consecuencias mediante características del diseño;
- protección, mediante características del diseño, contra sabotajes y ataques con armas convencionales;
- consideración de características de seguridad pasiva.

Designación	Tipo	Potencia (MWe)	Vendedor/diseñador	País
N4	PWR	1400	Framatome	Francia
CONVOY B	PWR	1350	Siemens	Alemania
EPR	PWR	1400-1500	NPI (Framatome/Siemens)	Francia/Alemania
SISTEM 80 +	PWR	1300	ABB/Combustion Eng.	Suecia
ABWR	BWR	1300	GE/Hitachi/Toshiba	EE UU/Japón
BWR 90	BWR	1100	Asea Brown Boveri (ABB)	Suecia
EFR	FBR	1500	European Fast Reactor Associates	Bélgica/Francia/Alemania/Italia/RU
CANDU	PHWR	600-900	AECL	Canadá
CANDU-3	PHWR	480	AECL	Canadá
AP-600	PWR	600	Westinghouse	EE UU
WWER 500/600	PWR	635	Hydropress/otros	Federación de Rusia
SBWR	BWR	600	General Electric (GE)	EE UU
PIUS	PWR	600	ABB	Suecia
VPBER-600	PWR	600	OKBM	Federación de Rusia
MHTGR	HTGR	4 x 170	General Atomics	EE UU
		4 x 80	Siemens/ABB	Alemania/Suecia
PRISM	LMR	3 x 150	General Electric	EE UU

Ejemplos de centrales nucleares avanzadas que se están construyendo en todo el mundo

En las próximas secciones se abordan algunos de los aspectos más importantes de esta enumeración de consideraciones generales reconocidamente imparcial.

Trabajo basado en la experiencia operacional

El intercambio y aprovechamiento de la experiencia operacional de las centrales nucleares está desempeñando una importante función en el diseño de la próxima generación de centrales nucleares. Todos los diseños de reactores avanzados se han basado, en la mayor medida posible, en experiencias anteriores, si bien, por definición, algunos de los diseños más innovadores incorporan características u otros aspectos respecto de los cuales quizás no exista mucha experiencia previa.

Toda característica del diseño de una central que no se haya comprobado previamente en la práctica deberá limitarse a componentes o sistemas introducidos sólo después de una investigación y comprobación exhaustivos del prototipo a nivel de componente, sistema o central, según corresponda. Para comprobar el comportamiento, incluso la seguridad de algunos de los diseños muy innovadores, quizás se requiera una central de demostración en gran escala.

Factores humanos. Las centrales avanzadas se están diseñando de modo que resulten fáciles de explotar y que el operador pueda comprender rápidamente el comportamiento de la central y, por consiguiente, reducir la posibilidad de error humano.

En los diseños se prevé el mayor grado posible de respuestas automáticas a situaciones anormales con un lapso suficiente (período de gracia) durante el cual no se requiera la participación del operador. Esto da al operador un margen para evaluar el suceso y el estado de la central y, posteriormente, tras un cuidadoso análisis, tomar las medidas pertinentes en caso necesario.

También se está perfeccionando la interfaz hombre-máquina gracias a las ventajas que ofrece la tecnología moderna electrónica, digital y de computadoras, por ejemplo, los microprocesadores, las proyecciones de vídeo, el multiplex, la fibra óptica, etc. Las pantallas y controles de alarma instalados de forma organizada y por orden de prioridad, los "sistemas especializados" y los sistemas de diagnóstico perfeccionados son tecnologías disponibles que se están aprovechando al máximo en los diseños nucleares avanzados.

En los nuevos diseños se destaca la simplificación

Algunos de los actuales diseños de centrales son innecesariamente complejos de operar, inspeccionar, mantener y reparar. La complejidad innecesaria es la génesis de una amplia diversidad de problemas y, por consiguiente, se está asignando una alta prioridad a la simplificación del diseño, sobre todo en lo que atañe a la seguridad operacional.

Se está estudiando la simplificación en cada aspecto del diseño y la explotación de las centrales avanzadas. La tendencia general en este sentido es incluir en el diseño únicamente sistemas que realicen funciones esenciales, y reducir la complejidad añadiendo márgenes de diseño o dando a las funciones esenciales un carácter pasivo, lo que reduce la necesidad de controles complejos.

La simplicidad en la explotación de la central contribuirá a facilitar la labor del operador y, por ende, a reducir el error humano. En fin, la simplicidad en el proceso de fabricación y construcción suele considerarse un objetivo prioritario.

Por definición, las características de seguridad pasiva no dependen de actos humanos y, en cierta medida, tampoco de energía, señales o fuerzas externas de índole mecánica y/o eléctrica. En cambio, sí dependen de fuentes espontáneas de fuerza motriz como la circulación natural y mecanismos de accionamiento como las válvulas de retención.

Existen varios niveles de "pasividad", incluso sistemas que se ponen en marcha activamente pero que funcionan pasivamente. El empleo de características de seguridad pasiva en una central nuclear es un método conveniente para lograr la simplificación y aumentar la fiabilidad de las funciones de seguridad esenciales, a saber, control y parada del reactor, enfriamiento del núcleo y del recinto de contención, y retención de los productos de fisión.

Los sistemas pasivos también suelen reducir los requisitos de redundancia, la complejidad operacional y la necesidad de que intervenga el operador. Ofrecen posibilidades de lograr más fiabilidad y presentan menos incógnitas funcionales que los sistemas activos. Un aspecto importante de los sistemas pasivos es que dependen exclusivamente de fuentes de energía almacenada y de fácil acceso, de ahí su capacidad para funcionar cuando se producen cortes de suministro eléctrico en la central. El uso de características pasivas ya se ha incorporado hasta cierto punto en las centrales existentes. Se está analizando la posibilidad de utilizarlas más en los sistemas de seguridad de muchas centrales avanzadas.

Las evaluaciones deterministas y probabilistas de la seguridad se complementan entre sí

En general se reconoce que las evaluaciones probabilistas de la seguridad (EPS) son muy importantes para determinar los puntos vulnerables de una configuración de diseño determinada. También proporcionan valiosos conocimientos sobre la probabilidad de escenarios de accidentes. Pese a las reconocidas limitaciones de los EPS, diferentes grupos han propuesto en varias ocasiones objetivos relacionados con ellas. Por ejemplo, el GIASN propuso los objetivos mínimos siguientes para las centrales futuras:

- Limitación de la frecuencia de daños graves al núcleo a 10^{-5} por año reactor;
- Limitación de la frecuencia de escapes al exterior del emplazamiento a 10^{-6} por año reactor.

Estos son objetivos de diseño y aún no se ha demostrado que cada diseño pueda cumplirlos, pese a que algunos diseñadores están tratando de lograr

cifras incluso menores. Con todo, en términos generales, se considera que estos valores son factibles.

Ahora bien, en lo que respecta al concepto de defensa en profundidad, la prudencia impone utilizar también métodos no probabilistas, como el análisis determinista y un juicio técnico certero, en particular si la EPS indica un nivel muy bajo de probabilidad de accidentes. Este doble enfoque brinda el máximo grado de garantía de que el nivel de energía del núcleo está controlado, se mantiene un enfriamiento adecuado y la radiactividad está contenida en condiciones de seguridad, aspectos que constituyen la esencia de la seguridad nuclear.

Las centrales nucleares avanzadas entrañan beneficios para el medio ambiente

Muchos opositores de la opción nuclear aceptan que, en cantidades suficientes y a precios atractivos, la energía nucleoelectrica sería mucho más ventajosa para el medio ambiente que otras formas establecidas de generación de electricidad si, fundamentalmente, se resolvieran las cuestiones relacionadas con los accidentes graves de un modo que estimaran satisfactorio. Los diseñadores de la próxima generación de centrales nucleares otorgan máxima prioridad a este aspecto.

Las centrales existentes cumplen requisitos de diseño conservadores dentro del marco de un conjunto definido de accidentes que se denomina base del diseño para la concesión de licencias. Las centrales futuras tendrán que cumplir esta misma base del diseño para obtener las licencias correspondientes y, además, se considerarán sucesos de probabilidad aún menor explícita y sistemáticamente.

Se están analizando muchos enfoques dentro de un nuevo marco común de principios generales de seguridad. Aunque esos enfoques pueden diferir en cuanto a los detalles, se está realizando un gran esfuerzo mancomunado para reducir a un nivel insignificante las consecuencias fuera del emplazamiento, sea cual fuere la gravedad del accidente. Este principio siempre ha formado parte de la filosofía básica de seguridad.

En el contexto de la base del diseño se analizaron exhaustivamente hipótesis verosímiles de accidentes graves, y la central se diseñó con suficientes barreras para prevenir y mitigar las consecuencias de dichos accidentes. Reconociendo que quizás podrían producirse secuencias de sucesos menos verosímiles, fue preciso establecer márgenes de diseño muy amplios y contramedidas fuera del emplazamiento.

Como resultado de ello, los planes de emergencia para las centrales nucleares, a diferencia de los planes de emergencia para otras actividades industriales, tenían que incluir obligadamente disposiciones complejas para la rápida utilización de refugios y/o evacuación. Esas disposiciones unidas a los requisitos de notificación rápida asociados, hacían recaer enormes responsabilidades sobre el propietario de la central y sobre los diversos organismos públicos que debían entrar en acción rápidamente. Algunos estudios y evaluaciones recientes de hipótesis de accidentes nucleares indican que tal vez la evacuación rápida no sea necesaria para la seguridad del

público y que procede adoptar un enfoque más ordenado.

Por consiguiente, los diseñadores y usuarios de las futuras centrales nucleares se han interesado particularmente en el análisis de accidentes más realistas, en estrategias de protección y en características encaminadas a la prevención y mitigación con el objetivo de retardar durante un período razonable la ocupación de refugios o la evacuación y, de ser posible, crear una base técnica firme que permita prescindir totalmente de esas medidas. Asimismo, debido al accidente de Chernobil, recientemente se ha centrado la atención en garantizar que no se produzca una contaminación de las tierras y aguas aledañas capaz de afectar significativamente la salud pública, o al menos limitar esta contaminación en espacio y tiempo. Se ha destacado en particular que la contaminación no debe requerir la reubicación de gran número de personas por largo tiempo.

El perfeccionamiento de todas las barreras dentro del principio de defensa en profundidad, inclusive una gestión idónea de los accidentes junto con la incorporación de los resultados de investigaciones modernas y de análisis más realistas de los accidentes, ha proporcionado ya la base técnica para minimizar y retardar los escapes radiactivos. Esto permitiría simplificar la planificación de emergencia para los reactores avanzados, y a la vez fomentar una mayor aceptación del público.

Entre otros aspectos encaminados a reducir los efectos ambientales de las centrales nucleares avanzadas cabe mencionar la disminución de las dosis profesionales, la reducción al mínimo de la producción de desechos y la introducción de mejoras en el ciclo del combustible.

La excelencia técnica fomenta la aceptación

Los sistemas nucleoelectricos avanzados aprovecharán la experiencia acumulada con los actuales sistemas y los resultados de la investigación y el desarrollo a nivel mundial. Es posible aumentar la seguridad y al propio tiempo reducir los costos, sobre todo cuando es alto el grado de normalización.

En el contexto del principio de defensa en profundidad, los diseños avanzados mejoran las barreras hasta tal punto que cualesquiera consecuencias fuera del emplazamiento en caso de accidente grave, si las hubiere, podrían atenderse con procedimientos de planificación para casos de emergencia muy simplificados.

El éxito de estos diversos diseños depende no sólo de su excelencia técnica. Depende también de la comprensión y aceptación de la energía nucleoelectrica por parte del público y de los encargados de tomar decisiones, es decir, de que reine en general un clima más favorable para la opción nuclear. □

La próxima generación: referencias sobre nuevas publicaciones técnicas

Las referencias que figuran a continuación abarcan informes técnicos publicados recientemente por el OIEA.

Cultura de la Seguridad, Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear (GIASN), Colección Seguridad N° 75-INSAG-4, OIEA, Viena (1991).

The Safety of Nuclear Power: Strategy for the Future, actas de una conferencia celebrada del 2 al 6 de septiembre de 1991, OIEA, Viena (1992).

Principios básicos de seguridad para centrales nucleares, Colección Seguridad N°75-INSAG-3, OIEA, Viena (1989).

The Safety of Nuclear Power, Colección Seguridad N° 75-INSAG-5, OIEA, Viena (1992).

Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Light Water Reactors, IAEA-TECDOC 479, Viena (1988).

Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Heavy Water Reactors, IAEA-TECDOC 510, Viena (1989).

Gas-Cooled Reactor Design and Safety, Colección de Informes Técnicos N° 312, OIEA, Viena (1990).

Safety-related Terms for Advanced Nuclear Plants, IAEA-TECDOC 626, Viena (1991).

Safety of Nuclear Installations: Future Directions, IAEA-TECDOC 558, Viena (1990).

En todo el mundo se están desarrollando más de 40 diseños para la próxima generación de centrales nucleares. (Cortesía: Mitsubishi)

