

## La próxima generación de centrales nucleares y las generaciones sucesivas: Crecen las aspiraciones

*Un objetivo común impulsa el desarrollo de reactores avanzados*

**C**asi todos los países que tienen programas nucleoelectrónicos civiles están desarrollando versiones mejoradas de las centrales nucleares actuales para que entren en funcionamiento antes de que termine el siglo. Se les llama centrales evolutivas, ya que han ido incorporando mejoras de forma gradual, aprovechando la experiencia acumulada en las centrales nucleares existentes, que, en su conjunto, han registrado más de 6000 años-reactor de explotación. Las mejoras que se persiguen incluyen muchos aspectos que van desde el diseño, la construcción y la explotación hasta la seguridad y los aspectos económicos.

En particular, el mejorar la seguridad más allá del notable nivel alcanzado en la gran mayoría de las centrales existentes es un objetivo común. Una comparación imparcial con los demás medios de producción de electricidad en gran escala y a bajo costo, como la que se presentó ante el Simposio de Expertos Superiores de Helsinki en 1991, demuestra que la energía nuclear es muy superior en lo que se refiere a la disminución de los efectos que tiene sobre la vida humana y el medio ambiente. Aunque esto no es nuevo, conviene reiterarlo y darle la publicidad adecuada para eliminar las dudas de un público escéptico, a menudo confundido por los medios de difusión sensacionalistas, para tranquilizar a los políticos y, aunque resulte un tanto sorprendente, tranquilizar también a algunas personas que, incluso perteneciendo a la comunidad nuclear, albergan dudas.

En el presente artículo, el término seguridad se refiere al resultado de la consecución, por medios técnicos, de los dos objetivos fundamentales siguientes: el primero, diseñar, construir, explotar y mantener la central del reactor de manera tal que ni los fallos del equipo, los errores de los operadores ni sucesos externos como los terremotos puedan producir el sobrecalentamiento del combustible nuclear y,

como consecuencia, la subsiguiente liberación de peligrosas cantidades de radiactividad hacia el sistema de refrigeración del reactor. Segundo, proporcionar y mantener un blindaje de contención fuerte y hermético alrededor del sistema de refrigeración del reactor para retener la mayor parte de la radiactividad que pudiera haber escapado en una secuencia de accidentes que no concluya dentro de la central propia del reactor, como debería ser con arreglo al primer objetivo.

Lo importante es que casi todos los reactores actualmente en funcionamiento cumplen en gran medida los principios de seguridad internacionalmente aceptados. Para alcanzar esta condición, habría que modernizar muchas de las centrales antiguas con nuevo equipo en la propia central, con tableros de control mejorados desde el punto de vista ergonómico y con procedimientos de explotación perfeccionados, esto último junto con la capacitación intensiva de los operadores.

El minucioso examen del grave accidente ocurrido en 1979 en la central de Three Mile Island (TMI) dio un gran impulso en ese sentido. Otras enseñanzas se han extraído de la incesante acumulación de experiencia en materia de explotación a nivel mundial. Sobre esta experiencia existe un franco intercambio a nivel internacional entre explotadores, diseñadores, instituciones de investigación y desarrollo y organizaciones reglamentadoras. Estas enseñanzas constituyen una importante contribución a los diseños de la próxima generación de centrales nucleares evolutivas. Es de esperar que esta contribución aumentará todavía más la seguridad de las centrales nucleares, porque las medidas de modernización antes mencionadas pueden ejecutarse durante el diseño mismo, lo que es mucho más eficaz que readaptar las centrales existentes.

A la hora de evaluar o "medir" las mejoras en materia de seguridad los diseñadores emplean métodos complejos que se están utilizando también en otras industrias, como la industria aeroespacial. Uno de los métodos se conoce con el nombre de evaluación probabilista de la seguridad (EPS), la que básicamente describe, o representa con modelos,

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

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

toda la central nuclear atendiendo a la acción recíproca de los componentes, los sistemas, y las funciones y participación de los operadores. Con ese método se determina la probabilidad de que alguna de las capas de defensa no pueda impedir que un fallo o error inicial se propague hasta convertirse en un fallo grave del combustible. Este método permite evaluar una gran cantidad de sucesos iniciales y las consecuencias, y obtener una cifra acumulativa única que representa la probabilidad de daños graves al núcleo por reactor y año. Esa cifra característica ha disminuido significativamente, de uno cada mil casos, que solía registrarse antes del accidente de TMI, a mucho menos de uno cada diez mil que se registra en la actualidad. El objetivo de la próxima generación de centrales nucleares es conseguir otra reducción de un factor de 10 por lo menos. La mayoría de los diseñadores se esfuerzan por llegar a la cifra de uno de cada millón.

Además de que permiten evaluar esas cifras para hacer una comparación de la efectividad de las distintas opciones de diseño que existen para satisfacer el principio de defensa en profundidad, las evaluaciones probabilistas ayudan, y obligan, al diseñador a identificar los puntos débiles del diseño, indican con claridad dónde hay que introducir mejoras y facilitan la selección de las mejores contramedidas técnicas. Los niveles de seguridad alcanzados son muy altos y cabe prever nuevas mejoras. Por consiguiente, no hay razón para que no continuemos desarrollando por mucho tiempo las centrales del tipo evolutivo que actualmente están en construcción o en diversas etapas de planificación.

No obstante, pese al historial tan satisfactorio de la energía nucleoelectrica, los expertos desarrollan intensos debates sobre cuál es el mejor camino a seguir, no porque el grado de seguridad alcanzado sea insuficiente, sino más bien porque se trata de lograr un nivel de excelencia. En particular, algunos esperan que si se obtienen mejores resultados se podrían hacer grandes progresos en la recuperación de la aceptación del público.

En ese sentido, pueden definirse dos grandes tendencias. En la primera se destaca la conveniencia, o incluso la necesidad, de continuar el camino evolutivo, en primer lugar porque la experiencia cada vez mayor que se adquiere con las centrales existentes proporciona una base sólida para el futuro. Un ulterior aumento de la seguridad, donde se considere necesario, puede lograrse mejor dentro de ese marco. En la segunda, por el contrario, se aboga por la adopción de un enfoque novedoso con concepciones más innovadoras de los reactores, en especial si el objetivo es aumentar considerablemente el uso de la energía nucleoelectrica. Ambos puntos de vistas se examinarán brevemente.

### El enfoque evolutivo

En lo que respecta a mejorar la seguridad de la próxima generación de reactores avanzados refrigerados por agua, se procura mejorar la protección contra las consecuencias de un accidente grave, como la fusión del combustible. La investigación de los fenómenos que provocan accidentes graves es una de las labores más importantes de investigación

y desarrollo que se llevan a cabo en todo el mundo. Su objetivo es identificar de manera más precisa todos los peligros potenciales para el comportamiento previsto de la contención y eliminar mediante normas de diseño todos los puntos débiles que puedan hallarse. El objetivo final de esos trabajos es poder demostrar que, desde el punto de vista técnico, no se requeriría adoptar medidas de emergencia, como la evacuación, para proteger al público incluso después de un accidente grave dentro de la central nuclear. La repercusión del accidente habrá de limitarse al emplazamiento mismo, para no trastornar la vida de la población fuera de éste.

Incorporar ese objetivo en una recomendación de aceptación internacional es una de las principales actividades del OIEA. Los principios establecidos por el Grupo internacional asesor en seguridad nuclear (INSAG), órgano que asesora al Director General del OIEA, se adaptarían bien a esos fines. En esencia, habría que ampliar el objetivo de seguridad técnica enunciado en el informe conocido como INSAG-3\* de modo que abarque también los accidentes graves que exceden los llamados accidentes tipo o accidente base de diseño (design basis accidents). Además, sería menester introducir determinadas modificaciones en los principios relativos a la contención, y quedaría mucho trabajo todavía por hacer para definir las consecuencias técnicas.

### Los enfoques innovadores

Muchos de los partidarios de aplicar enfoques innovadores en el diseño de los futuros reactores tienen otra opinión. Ellos argumentan que si bien la seguridad de los reactores evolutivos presentes y futuros es aceptable, su aplicación y mantenimiento con el decursar del tiempo exigen la utilización de sistemas técnicos demasiado complejos desde el punto de vista funcional y que constituyen una responsabilidad muy grande e indeseable para el operador. Ellos reclaman centrales mucho más sencillas, cuya seguridad básica dependa mucho menos —y, en caso extremo, no dependa en lo absoluto— del funcionamiento adecuado de los sistemas técnicos de seguridad y de las respuestas acertadas de los operadores en comparación con las centrales evolutivas. Algunos partidarios también consideran que tales conceptos innovadores sobre los reactores aumentarían significativamente la aceptación de la energía nucleoelectrica por parte del público.

Se esgrime además el otro argumento de que la necesidad de enfoques innovadores es mucho más imperiosa si se quiere difundir sustancialmente la energía nucleoelectrica en el futuro, extendiéndola a muchas regiones del planeta que hoy día tienen poca o ninguna experiencia en esa tecnología. ¿Tenemos los medios —se preguntan— para crear, garantizar y mantener los enormes recursos tecnológicos y humanos que se necesitan para diseñar, otorgar licencias, construir, explotar y mantener a los descendientes evolutivos de los actuales reactores, de manera que

\* Principios básicos de seguridad para centrales nucleares. Colección Seguridad N° 75-INSAG-3 del OIEA, Viena (1988).

la seguridad deseada pueda mantenerse invariable en todo el mundo durante largo tiempo? O, en otras palabras, ¿facilitarían esa tarea los conceptos innovadores acerca del reactor? Esta es una de las líneas de pensamiento que favorecen los enfoques innovadores. En otra se afirma en primer lugar que en el diseño se puede descartar previamente la remota posibilidad de la ocurrencia de daños graves al núcleo, lo que, en última instancia, aumentaría la aceptación de la energía nucleoelectrica por parte del público.

Simplificar y hacer al reactor más resistente a los fallos del equipo y a los errores del operador, es también un objetivo explícito de las centrales evolutivas. En consecuencia, la polémica entre evolución e innovación se centra menos en los objetivos de la seguridad que en los medios de alcanzarlos; por tanto, es de naturaleza puramente técnica.

Durante muchos años se ha venido debatiendo un gran número de conceptos innovadores. Algunos se basan en la tecnología de los reactores de agua ligera, otros se derivan del desarrollo de reactores refrigerados por metal líquido o por gas. En cuanto a su madurez, esos conceptos van desde las ideas preconceptuales hasta las muy desarrolladas que están respaldadas por una considerable labor de investigación y desarrollo específicos. Sin embargo, la opinión que prevalece es que cada concepto requeriría un prototipo de tamaño industrial adecuado para que pueda considerarse como una opción para la expansión del uso de la energía nucleoelectrica. Algunos de esos conceptos tendrían incluso que ser sometidos a pruebas de viabilidad *a priori*.

Como estos conceptos se proponen con la finalidad de mejorar la seguridad, todos tratan de satisfacer dos importantes objetivos en esa materia. Uno es reducir, o incluso eliminar, la necesidad de que los operadores apliquen las medidas correctas al controlar los accidentes graves. El otro, suprimir la necesidad de utilizar un flujo de refrigerante forzado para eliminar el calor residual que todos los elementos combustibles del reactor liberan incluso después de concluida la reacción nuclear en cadena. En ese contexto, el flujo forzado significa no depender de maquinarias rotatorias, como las bombas, ni de la energía necesaria para hacerlas funcionar. Algunos de los conceptos tratan de lograr esa "eliminación pasiva del calor residual", como suele llamarse, también para los casos en que el sistema de refrigeración del reactor se ha visto afectado por un escape accidental.

Si bien se diferencian en cuanto a las soluciones individuales, todos los conceptos innovadores tratan de incorporar en el diseño en la mayor medida posible métodos de protección contra los accidentes. Ningún suceso inicial, por ejemplo, la interrupción de fluido eléctrico provocada por una fuerte tormenta, debe llegar a poner en peligro la integridad de los elementos combustibles. De los tres requisitos enunciados por el INSAG, a saber, el control de la potencia del reactor, la refrigeración del combustible, y el confinamiento de las sustancias radiactivas dentro de las barreras apropiadas, los conceptos innovadores hacen hincapié en los dos primeros.

Por tanto, dichos conceptos hacen el mayor hincapié en el nivel preventivo de conformidad con los

principios de la defensa en profundidad, y con el principio del INSAG de que "se presta gran atención al medio fundamental de alcanzar la seguridad, que es la prevención de accidentes, en particular de los que pudieran causar daños graves al núcleo".

Por consiguiente, apenas pueden criticarse los conceptos innovadores sobre la base de que éstos se apartarían de los principios establecidos, lo que constituye un importante aspecto estratégico. Por el contrario, el precio en función de los gastos de capital sí parece alto, pero la solución hay que buscarla y ofrecerla en otra parte del diseño haciendo menos estrictos determinados requisitos técnicos.

Los conceptos innovadores tratan de reducir la "cultura de la seguridad" que actualmente se aplica en los reactores en explotación, ya que en situaciones de emergencia la respuesta del operador, o la función de determinados sistemas en algunos casos, no es decisiva para conseguir una protección adecuada. Es algo sorprendente que el error, la indiferencia o incluso la mala intención del operador se consideren mucho más peligrosos para la seguridad que los fallos del equipo. De lo anterior pueden extraerse dos conclusiones. La primera respetaría el principio de defensa en profundidad. La redundancia, la diversidad y la separación física, conjuntamente con la devoción del operador por la seguridad ("cultura de la seguridad") están probadas y se ha reconocido su efectividad y utilidad. La segunda conclusión es la siguiente: si se logran la simplificación del sistema y las mejoras en la interfaz hombre-máquina con un grado todavía mayor de automatización, objetivo explícito de las centrales evolutivas, entonces se podría considerar que se han reducido notablemente las inquietudes sobre los operadores. En otras palabras, gran parte de lo que constituye la principal fuerza impulsora de los conceptos innovadores se logrará también con los diseños evolutivos.

### Esclarecimiento y armonización

Un objetivo expresado por algunos partidarios de los reactores innovadores es producir diseños que puedan denominarse "seguros desde el punto de vista determinista". Ello significa que sería conveniente que se pudiera demostrar al público que se ha logrado la seguridad adecuada sin hacer énfasis en argumentos probabilistas. Mientras no se comprenda que "ante cualquier circunstancia nada puede suceder", posición ésta muy difícil de defender, es probable que las antípodas del enfoque evolutivo y del enfoque innovador coincidan. En última instancia, ambos enfoques tienen por objetivo demostrar que pueden excluirse los accidentes con graves consecuencias para el público. Los medios para alcanzar este objetivo son deterministas en cualquiera de los casos. Los diseños evolutivos lo hacen proporcionando capas sucesivas de protección y mitigación en el marco del método de defensa en profundidad. Los diseños innovadores tratan de incorporar dispositivos específicos como grandes sumideros de calor temporales y vías para disipar el calor de desintegración de manera pasiva, como se le llama en algunos casos.

Por lo tanto, la frase reactores "seguros desde el punto de vista determinista" puede incluir caracte-

rísticas intrínsecas y dispositivos pasivos, activos y de otro tipo para alcanzar el objetivo final de no generar consecuencias graves para el público. Desaparecería buena parte de la confusión que producen términos como pasivo, intrínseco o indulgente, cuando se aplican incorrectamente a toda la central, pero muy correctos cuando se refieren a sistemas o funciones específicos. Asimismo, resultaría mucho más fácil para el público, que realmente sólo desea saber si un accidente puede afectarlo o no, en lugar de tener que decidir sobre detalles técnicos, sobre los cuales tiene pocos conocimientos.

Los análisis probabilistas seguirían siendo necesarios para determinar las secuencias de accidentes posibles que necesitan protección determinista, tanto en el caso de las centrales evolutivas como de las innovadoras. No obstante, debe decirse claramente que, "seguros desde el punto de vista determinista" sólo significa en última instancia que las probabilidades de consecuencias graves son tan pocas que deberían aceptarse como las de cualquier otra catástrofe importante.

En el caso de las centrales evolutivas futuras las probabilidades son suficientemente bajas; las de las centrales innovadoras no necesitan modificaciones. Si tenemos en cuenta esos atributos, ambos tipos podrían considerarse seguros desde el punto de vista determinista. En lo que al público respecta, no queda ningún dilema por resolver y no cabe sostener una opinión divergente.

El debate debe desarrollarse entre especialistas en el seno de la comunidad nuclear y deberá centrarse no en cuál es el concepto más seguro, con independencia del costo, sino en cuál concepto genera menos gastos para alcanzar un nivel de seguridad comúnmente aceptado.

### Incentivos y limitaciones para el futuro

**Incentivos.** Los conceptos innovadores no pueden justificarse primordialmente por razones de seguridad, sino que tienen que satisfacer otras necesidades. Probablemente las más importantes tengan que ver con las posibilidades de esas centrales de ayudar a satisfacer el creciente consumo energético en el mundo, y al mismo tiempo, reducir el problema del efecto de invernadero.

Para los países industrializados la simplificación es un objetivo importante que se deberá alcanzar en la próxima generación de centrales evolutivas. ¿Cuánto influirá ese objetivo en los países menos adelantados que tendrían que "nuclearizarse" en el contexto antes mencionado? Es casi inconcebible que a las naciones industrializadas corresponda la mayor parte del aumento de la potencia que se calcula entre cinco y diez veces mayor que la instalada. Los requisitos previos de una cultura de la seguridad y de una infraestructura adecuadas constituyen graves impedimentos para el aumento sustancial del uso de la energía nucleoelectrica en todo el mundo. Es imperativo realizar una evaluación de los costos asociados, ya que éstos influirán en las decisiones necesarias. Si, como se sospecha, los costos resultan elevados, entonces la elaboración de diseños que evadan ese problema bien puede ser un esfuerzo que merezca una consideración cuidadosa. No obstante,

si pudiera encontrarse una solución para un "concepto de la cultura de la seguridad baja", ello produciría dos problemas. El primero sería ¿cómo podría coexistir a la larga con los enfoques tradicionales? ¿Podrían los reglamentadores vivir con una población de dos clases de reactores? Y el segundo sería ¿habrá clientes dispuestos a reconocer que necesitan esa clase de concepto especial porque ellos no pueden hacer nada mejor? ¿No se sentirán discriminados?

El logro del nivel de seguridad deseado siempre depende de la combinación apropiada de tres cualidades principales: la de la central propiamente dicha, la de la infraestructura existente, por ejemplo, la red de distribución, y la de los operadores con la capacitación adecuada. Si las dos últimas resultan deficientes, entonces la máquina tiene que compensarlas. Si puede encontrarse un reactor que haga precisamente eso, ¿cuáles son las consecuencias si éste se volviera a importar a los países industrializados? ¿Significaría que en ese caso habría entonces una nueva norma que los reglamentadores harían obligatoria?

**Limitaciones.** Sin embargo, existen graves limitaciones que obstaculizan la rápida expansión de la energía nucleoelectrica, estén basadas o no en la evolución o la innovación. Dejando a un lado las cuestiones relacionadas con los aspectos económicos favorables, la evacuación definitiva de desechos, el tratamiento de las centrales existentes no satisfactorias, y la no proliferación, entre las limitaciones más importantes están, casi como norma, las siguientes: la sensibilización del público, que debe comprender los beneficios de la energía nucleoelectrica y, en consecuencia, aceptar su conveniencia, o incluso su necesidad. El público de los países industrializados debe comprender también que la expansión de la energía nucleoelectrica a los países en desarrollo requerirá extraordinarios esfuerzos financieros. En tercer lugar, la promoción de los conceptos innovadores no debe hacerse de una manera que ponga en tela de juicio los planes para el futuro próximo con los conceptos evolutivos. Si eso no se comprende, puede ser que la opción nuclear se pierda completamente.

Vencer esas limitaciones es una empresa colosal. Convendría desarrollar un plan básico apropiado en que se defina con más detalle las tareas complementarias que habrán de emprenderse y cómo iniciarlas, con miras a fomentar un dinámico resurgimiento nuclear y su expansión después del primer decenio del próximo siglo. El OIEA sería la institución ideal para ejecutar ese plan.