

## Seguridad de los reactores RBMK: Establecimiento del marco técnico

*El programa de cooperación del OIEA está consolidando las bases técnicas para seguir aumentando la seguridad de los reactores tipo Chernobil*

por  
Luis Lederman

**E**n abril de 1986 la unidad 4 de la central nuclear de Chernobil en Ucrania quedó destruida durante el peor accidente de la historia de la energía nucleoelectrónica con fines industriales. El reactor, que entró en funcionamiento en 1983, era una central nuclear de diseño soviético conocida por las siglas en ruso RBMK.

El RBMK tuvo su origen en los reactores soviéticos de uranio y grafito, cuyo objetivo era la producción de plutonio. El primero de estos reactores productores de plutonio entró en funcionamiento en 1948. Seis años después, en 1954, comenzó a funcionar en Obninsk un reactor de demostración tipo RBMK de 5 MWe para la generación de electricidad. Posteriormente se desarrolló una serie de reactores RBMK usando la combinación de moderación por grafito y enfriamiento por agua en un diseño de canales.

En estos momentos, 15 reactores de potencia RBMK están generando electricidad en tres Estados: 11 unidades en Rusia, dos en Ucrania y dos en Lituania. Salvo dos RBMK, todos tienen una potencia eléctrica nominal bruta de 1000 MWe; las excepciones son las dos unidades de Ignalina, en Lituania, que tienen una potencia eléctrica nominal bruta de 1300 MWe.

De 1973 (Leningrad-1) a 1990 (Smolensk-3), todos los RBMK se conectaron a la red de energía eléctrica. Ellos representan generaciones distintas, con diferencias significativas de diseño en lo que a seguridad se refiere.

Seis centrales se consideran unidades de la "primera generación" (Leningrad-1 y -2; Kursk-1 y -2; y Chernobil-1 y -2). Fueron diseñadas y conectadas a la red entre principios y mediados del decenio de 1970, antes de que se introdujeran en la Unión Soviética nuevas normas para el diseño y construcción de centrales nucleares (OPB-82). Las unidades que entraron en servicio desde finales del decenio de 1970 y principios del de 1980 suelen clasificarse como la "segunda generación" de RBMK (Leningrad-3

y -4; Kursk-3 y -4; Ignalina-1; Chernobil-3; y Smolensk-1 y -2). Ignalina-2 posee características de seguridad más avanzadas que las demás unidades de la segunda generación, que son RBMK diseñados y construidos conforme a las normas actualizadas publicadas en 1982.

Tras el accidente de Chernobil, se revisaron de nuevo las normas de seguridad soviéticas (OPB-88), y uno de los RBMK (Smolensk-3) se construyó conforme a estas normas de la "tercera generación". En la construcción de Kursk-5 se están introduciendo nuevos cambios de diseño.

Los diseñadores y explotadores rusos han hecho un esfuerzo considerable durante el último decenio para aumentar la seguridad de los reactores RBMK y erradicar las causas que provocaron el accidente de Chernobil. Gracias a estos trabajos se han ejecutado importantes modificaciones en el diseño y en la gestión de las operaciones. Así y todo, persisten las preocupaciones en torno a la seguridad, en particular respecto de las unidades de la primera generación.

En este artículo se pasa revista a las principales actividades realizadas para aumentar la seguridad de los reactores RBMK mediante un programa de cooperación del OIEA iniciado en 1992. (Véase el recuadro de la página 12.) Se abordan específicamente las conclusiones técnicas de los exámenes de la seguridad relacionados con el diseño y la explotación de las centrales, así como la documentación de las conclusiones mediante una base de datos del Organismo destinada a facilitar la coordinación técnica de las actividades en curso a nivel nacional e internacional para aumentar la seguridad de los RBMK.

### **Alcance del programa de seguridad de los RBMK**

El objetivo del programa del OIEA sobre la seguridad de los RBMK es consolidar los resultados de las diversas actividades nacionales, bilaterales y multilaterales y lograr un consenso internacional sobre las mejoras necesarias en materia de seguridad y las prioridades conexas. Asimismo, sirve de ayuda a las or-

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

### Centrales nucleares RBMK

#### Unidades en funcionamiento:

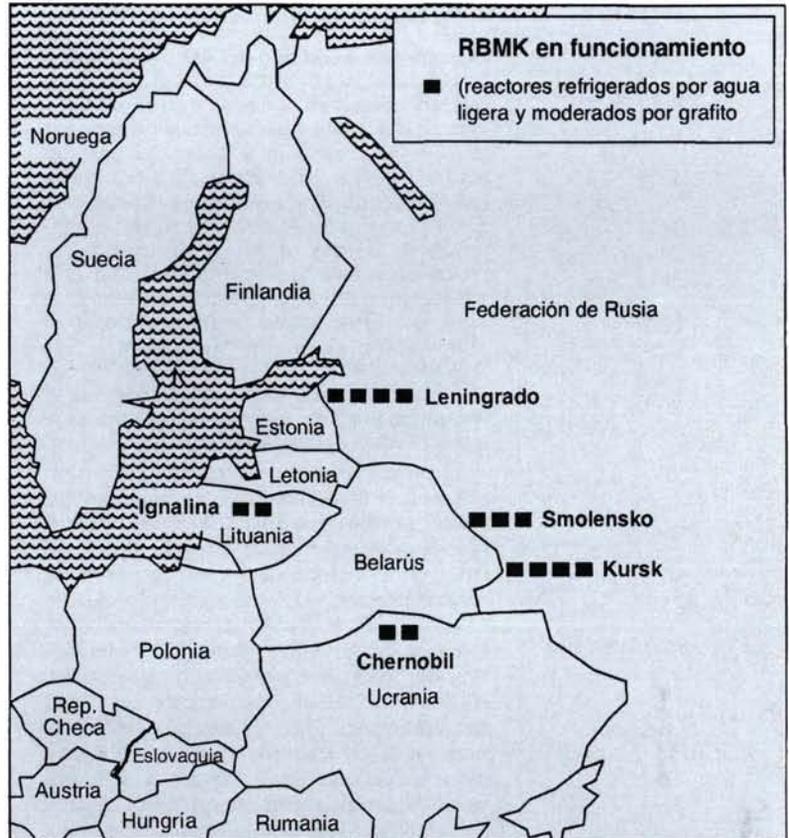
**Lituania.** Dos unidades de 1300 MWe en Ignalina. *Comienzo de la explotación con fines industriales:* Ignalina-1, en 1984; Ignalina-2, en 1987.

**Federación de Rusia:** Once unidades de 1000 MWe: cuatro unidades en Kursk; cuatro unidades en Leningrado; tres unidades en Smolensko. *Comienzo de la explotación con fines industriales:* Kursk-1, en 1977; Kursk-2, en 1979; Kursk-3, en 1984; Kursk-4, en 1986. Leningrad-1, en 1974; Leningrad-2, en 1976; Leningrad-3, en 1980; Leningrad-4, en 1981. Smolensk-1, en 1983; Smolensk-2, en 1985; Smolensk-3, en 1990.

**Ucrania:** Dos unidades en Chernobil. *Comienzo de la explotación con fines industriales:* Chernobil-1 (780 MWe) en 1978; Chernobil-3 (1000 MWe) en 1982. *Notas:* Chernobil-2 se paró desde 1991; Chernobil-4 quedó destruida en el accidente de abril de 1986.

#### Unidades en construcción:

**Federación de Rusia.** Kursk-5, unidad de 1000 MWe cuya construcción comenzó en diciembre de 1985.



ganizaciones reguladoras y explotadoras y permite establecer una base para la adopción de decisiones técnicas y financieras. El programa abarca una amplia gama de actividades, y, desde 1992, se ha realizado una serie de exámenes y evaluaciones. Durante la primera fase del programa, Smolensk-3 e Ignalina-2 sirvieron de centrales de referencia de los RBMK.

En octubre de 1992, el OIEA efectuó un primer examen de las mejoras de seguridad propuestas para los RBMK. En junio de 1993, se organizó una evaluación de la seguridad de las soluciones de diseño y de las propuestas para aumentar la seguridad de Smolensk-3, la cual fue llevada a cabo por un grupo internacional de expertos y personal del OIEA, en un plazo de dos semanas, en el emplazamiento de la central. Smolensk-3 es la más avanzada de las centrales RBMK en explotación y su diseño incorpora mejoras de seguridad emanadas de los análisis del accidente de Chernobil y de otros estudios. En octubre de 1994 se realizó un examen similar de las unidades de Ignalina.

Además, los Grupos de evaluación de sucesos significativos desde el punto de vista de la seguridad (ASSET) del Organismo han examinado la experiencia operacional de cada una de las centrales donde están emplazados todos los RBMK. En septiembre de 1995 también se llevó a cabo en Ignalina una misión del Grupo de examen de la seguridad operacional (GESO).

Los expertos también han examinado el diseño de los sistemas de parada en Smolensk-3. El examen, que fue el tema de una reunión de consultores del

OIEA celebrada en Suiza en diciembre de 1993, se basó en los documentos de las Normas de Seguridad Nuclear (NUSS) del OIEA; las normas nacionales (Rusia, Canadá y Alemania); y las prácticas de reglamentación de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). Expertos internacionales apoyaron plenamente el propósito de los diseñadores rusos de mejorar los sistemas de parada de los RBMK.

Otra cuestión que ha sido objeto de atención es el análisis de una rotura múltiple en los tubos de presión de estos reactores. En una reunión temática celebrada en Moscú en enero de 1994, los participantes examinaron los criterios de reglamentación pertinentes aprobados en los Estados Miembros que explotan reactores del tipo de canales, y examinaron la metodología, los criterios y los resultados de los análisis de la seguridad. Asimismo, coincidieron en la urgente necesidad de validar los códigos de computadora empleados para estudiar las situaciones hipotéticas de accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA) en los RBMK. En noviembre de 1994, en una reunión de consultores del OIEA celebrada en el Japón, se estableció una matriz de validación para el cálculo de códigos, y en 1995 el OIEA inició un ejercicio internacional basado en resultados experimentales suministrados por el Japón.

Las actividades del programa de seguridad de los RBMK del OIEA se coordinan con las de un consorcio internacional sobre la "Seguridad de las soluciones de diseño y la explotación de las centrales nucleares con reactores RBMK" establecido bajo los auspicios de la

### Programa de seguridad de los RBMK

A comienzos del decenio de 1990, el OIEA inició un programa para ayudar a los países de Europa central y oriental y a la antigua Unión Soviética a evaluar la seguridad de sus centrales nucleares WWER-440/230 de primera generación. Los principales objetivos eran: detectar los principales problemas de diseño y seguridad operacional; establecer un consenso internacional sobre las prioridades de mejoras en materia de seguridad; y prestar asistencia en el examen de la exhaustividad y la idoneidad de los programas de aumento de la seguridad. El alcance del programa se amplió en 1992 a fin de incluir los RBMK, los WWER-440/213 y los WWER-1000 en funcionamiento y en construcción. El programa se complementa con proyectos nacionales y regionales de cooperación técnica.

El programa incluye, entre otros elementos, exámenes de la seguridad de cada central a fin de evaluar la idoneidad del diseño y las prácticas operacionales; exámenes en virtud del servicio del OIEA de evaluación de sucesos significativos desde el punto de vista de la seguridad (ASSET); exámenes del diseño de la central, incluidos estudios de seguridad sísmica; y reuniones temáticas sobre cuestiones genéricas de seguridad. Además, se envían misiones de seguridad complementarias a las centrales para verificar la situación de las recomendaciones del OIEA; se hacen evaluaciones de las mejoras de seguridad introducidas o propuestas; se efectúan exámenes por homólogos de estudios de seguridad; se presta asistencia para fortalecer a las autoridades reguladoras; y se organizan talleres de capacitación. También se mantiene una base de datos sobre los problemas técnicos de seguridad detectados en cada central y la situación de las mejoras de seguridad.

Como se trata de un programa extrapresupuestario, las actividades dependen de las contribuciones voluntarias de los Estados Miembros del OIEA. Varios comités directivos se encargan de la coordinación y la orientación en materia técnica y sirven de centro de intercambio de información con la Comisión Europea (CE) y otras organizaciones internacionales y financieras. El programa tiene en cuenta los resultados de las actividades nacionales, bilaterales y multilaterales pertinentes, lo que brinda un marco que permite llegar a un consenso internacional sobre las bases técnicas para aumentar la seguridad de las centrales nucleares WWER y RBMK. Por conducto de la Comisión Europea el OIEA proporciona además asesoramiento técnico dentro de la estructura de coordinación establecida por el Grupo de los 24 países de la OCDE.

Los resultados, recomendaciones y conclusiones del programa sólo están destinados a ayudar a las autoridades nacionales, máximas responsables de la reglamentación, el mejoramiento y la explotación segura de sus centrales nucleares. Facilitan, y no reemplazan, la necesidad de efectuar evaluaciones integrales de la seguridad en el marco del proceso nacional de concesión de licencias.

Comisión Europea. Ambos programas utilizan las mismas centrales RBMK de referencia.

Con la terminación en 1994 de los exámenes de la seguridad de Smolensk-3 e Ignalina-2, estos dos programas llegaron a importantes fases de desarrollo. Para difundir los resultados entre los círculos técnicos internacionales, el OIEA convocó una reunión técnica en mayo-junio de 1995. Se presentaron los resultados de los programas del OIEA y de la Comisión Europea, lo que reflejó la gran cantidad de trabajo realizado por los expertos internacionales y las organizaciones rusas en el examen de la seguridad de las centrales nucleares RBMK.

De ambos proyectos emanaron muchas recomendaciones para aumentar la seguridad de las centrales RBMK. La mayoría de ellas están relacionadas con las medidas ya incluidas en los programas nacionales que se están aplicando en Rusia, Lituania y Ucrania para estas unidades.

En base a la fase inicial de su programa, el OIEA elaboró una lista consolidada de problemas de diseño y de seguridad operacional de los RBMK, empleando una base de datos de las conclusiones y recomendaciones para los RBMK elaborada por el OIEA. En la base de datos se incluyeron todas las conclusiones y recomendaciones de las diversas reuniones técnicas, los exámenes de la seguridad de Smolensk e Ignalina, y los informes ASSET del Consorcio Internacional de la Comisión Europea y posteriormente se agruparon por esferas temáticas en problemas de seguridad. También se incluyó la información sobre la seguridad de cada central, proporcionada por el principal instituto de diseño de los reactores RBMK en Moscú.

La base de datos del Organismo está conectada al banco de datos establecido por el Grupo de Coordinación sobre la Seguridad Nuclear del Grupo de los 24, lo que facilita el análisis conjunto de los temas de seguridad y los proyectos de asistencia.

### Resultados del programa del OIEA

El programa del OIEA reconoce 58 problemas de seguridad de los RBMK relacionados con siete esferas temáticas. Los problemas relativos a seis esferas de diseño también se clasifican conforme a su repercusión aparente sobre la seguridad de la central. Se consideran de suma importancia todos los problemas de seguridad relacionados con las esferas operacionales, en particular, los asociados a la garantía de un elevado grado de cultura de la seguridad.

La clasificación de un problema de seguridad no implica necesariamente que todas las recomendaciones propuestas tengan que aplicarse con la misma urgencia. Por eso es preciso analizarlas también en relación con cada central.

Dos problemas amplios relacionados con la garantía de calidad (GC) y los problemas de reglamentación, no se atribuyen de manera específica a ninguna esfera temática en particular, sino que se reconoce su incidencia en todas las esferas. Desde el punto de vista de la GC, la preocupación principal radica en asegurar el uso de la situación y la configuración reales de la central para diversos análisis, exámenes de la seguri-

**Panorama técnico de los RBMK**

El núcleo de los reactores RBMK se construye con bloques macizos de grafito apilados en columnas y con aberturas axiales. La mayoría de estas aberturas contienen canales de combustible. Algunas sirven también para otros fines (por ejemplo, instrumentación y control) y se denominan "canales especiales". La pila de grafito se encuentra dentro de una vasija cilíndrica de acero, de 14 metros de diámetro, que actúa como apoyo de la pila de grafito y como contenedor de la mezcla de gas helio y nitrógeno.

La masa total de grafito dentro del núcleo es de 1700 toneladas. Alrededor del 6% de la energía térmica del reactor se genera en la pila de grafito. La mezcla de helio y nitrógeno mejora la transferencia de calor desde el grafito hacia los canales, protege al grafito de la oxidación a su temperatura de funcionamiento de unos 650°C y, mediante el muestreo del gas, forma parte del sistema de vigilancia de la integridad.

Hay 1661 canales de combustible en los conductos verticales de las columnas de grafito; estos canales son tubos de 88 milímetros de diámetro de una aleación de circonio y niobio. Cada canal de combustible contiene dos conjuntos combustibles, uno encima del otro, y cada uno contiene 18 barras de combustible de 13,6 milímetros de diámetro, encerradas en la vaina de circonio y niobio. El combustible del núcleo tiene una longitud total de unos 7 metros.

**Cantidad y categoría de los problemas de seguridad de los RBMK**

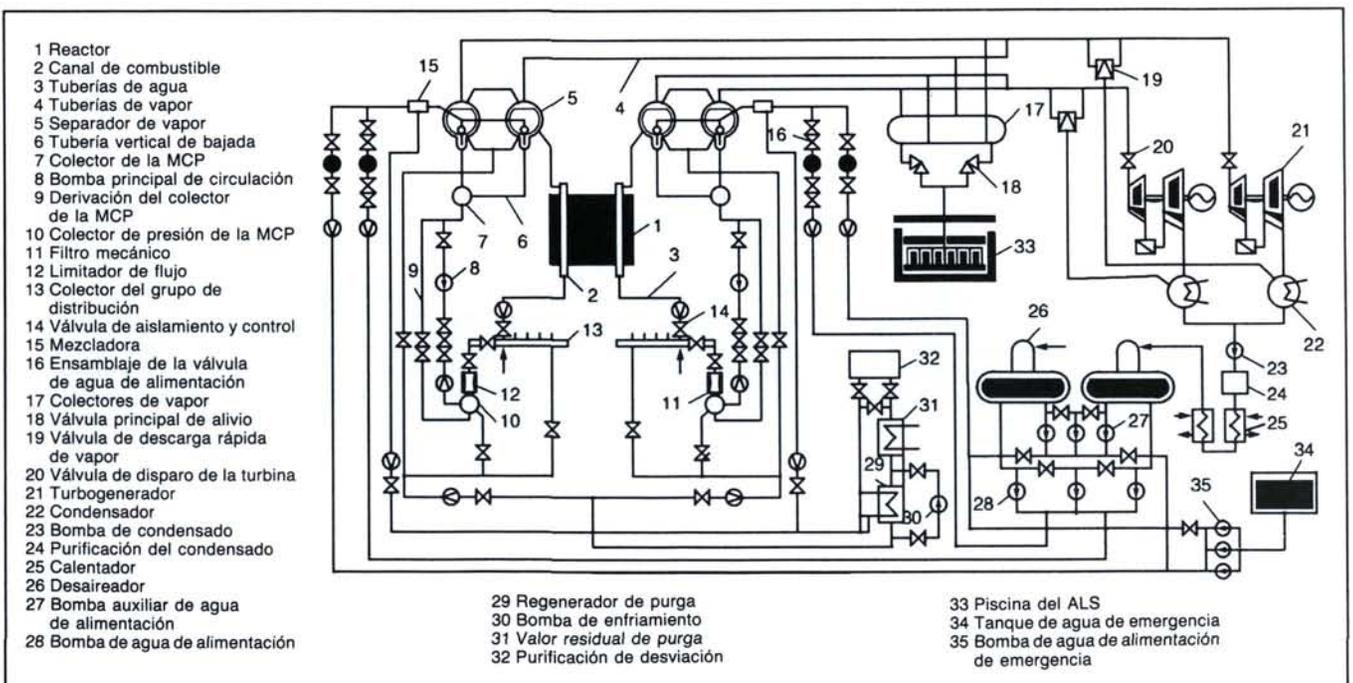
Esferas temáticas	Cantidad de problemas de seguridad	Cantidad de problemas de seguridad por categoría		
		Elevada	Media	Baja
Diseño y vigilancia del núcleo	6	5	1	0
Instrumentación y control	7	2	5	0
Integridad del confinamiento a presión	7	4	2	1
Análisis de accidentes	10	3	7	0
Sistemas de seguridad y de apoyo	10	4	6	0
Protección contra incendios	5	1	3	1
Seguridad operacional	13*	—	—	—
<b>Total</b>	<b>58</b>	<b>19</b>	<b>24</b>	<b>2</b>

\* Si bien no están clasificados, se consideran muy importantes y deben introducirse mejoras conjuntamente con modificaciones de diseño.

**Elevada:** Problemas que reflejan insuficiente defensa en profundidad y tienen una importante repercusión en la seguridad de la central. Es preciso tomar medidas a corto plazo para mejorar la seguridad según corresponda en cada central nuclear hasta que el problema quede resuelto totalmente.

**Media:** Problemas que reflejan insuficiente defensa en profundidad y tienen una repercusión significativa en la seguridad de la central. Tal vez sea necesario tomar medidas a corto plazo para mejorar la seguridad según corresponda en cada central nuclear hasta que el problema quede resuelto.

**Baja:** Problemas que reflejan insuficiente defensa en profundidad y tienen poca repercusión en la seguridad de la central. Es conveniente tomar medidas para mejorar la defensa en profundidad si procede y resulta eficaz en función de los costos.



### Diseño básico y mejoras de seguridad de los RBMK

Desde el accidente de Chernobil ocurrido en abril de 1986 se han introducido importantes mejoras de seguridad en los RBMK, mejoras éstas que atienden a las causas directas del accidente y otras deficiencias de seguridad detectadas en diversos análisis.

**Núcleo del reactor.** Las modificaciones de seguridad relacionadas directamente con el accidente de Chernobil se centran en reducir el coeficiente de reactividad en vacío y mejorar el diseño de las barras de control. Estas modificaciones se han introducido en todos los RBMK. Entre las principales medidas adoptadas para reducir el coeficiente de huecos cabe mencionar las siguientes:

- carga de absorbentes adicionales. El número de absorbentes adicionales varía de 85 a 103, según el reactor. Las especificaciones técnicas exigen, al menos, 81 absorbentes adicionales.
- aumento del enriquecimiento del combustible de 2,0% a 2,4%.
- control del margen de reactividad operacional (ORM). El valor plenamente insertado del ORM se controla entre 43 y 48 barras de control equivalentes.

**Sistema de protección de emergencia (SPE).** Se introdujeron tres mejoras para lograr una mayor eficiencia y rapidez de respuesta del SPE. Las barras de control manual se sustituyeron por barras de un diseño mejorado, que es la eliminación de la columna de agua en el fondo de los canales del sistema de control y protección del reactor, y el aumento de la sección de absorción de neutrones. También se modificaron los accionadores de las barras, con lo que se redujo de 19 a 12 segundos el tiempo requerido para insertar totalmente las barras dentro del núcleo. Estas dos medidas mejoraron la eficacia de respuesta del SPE durante los primeros segundos de la inserción de las barras. Como tercera medida, se desarrolló un SPE de acción rápida y se instaló en todos los reactores en funcionamiento. Este sistema permite insertar completamente 24 barras de control en menos de 2,5 segundos, o en 7 segundos según la señal de emergencia activada.

**Sistema de control y vigilancia.** Se tomaron otras medidas para mejorar el sistema de control y vigilancia, que son el disparo manual del reactor cuando la potencia es inferior a 700 MW(t); y el disparo manual si el ORM es inferior a 30 barras de control equivalentes.

**Frontera de presión.** Dos circuitos independientes refrigeran cada mitad del núcleo del reactor. Cada circuito contiene cuatro bombas principales de enfriamiento y tuberías conexas. La presión en el sistema es de 7 MPa.

**Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS).** En el caso de Smolensk-3, el accidente base de diseño del ECCS es una rotura de cizalla doble de un tubo de 900 mm y pérdida de energía eléctrica fuera del emplazamiento. Esto corresponde a una rotura en los colectores de presión o en el colector de succión de la bomba de circulación principal. En caso de un accidente de ese tipo, el ECCS se encarga de la refrigeración rápida del núcleo y de la eliminación del calor de desintegración a largo

plazo. El sistema de enfriamiento a largo plazo está compuesto por seis bombas de emergencia de refrigeración del núcleo que toman la succión del sistema de localización de accidentes (ALS) para refrigerar la mitad dañada del reactor y tres bombas que toman la succión de los tanques de condensado puro para enfriar la mitad no dañada del reactor. Ambos conjuntos de bombas son eléctricos y su suministro energético está apoyado por generadores diesel.

En las centrales RBMK de la primera y segunda generaciones se están introduciendo modificaciones de diseño que no están relacionadas con las causas del accidente de Chernobil. Entre otras medidas, las modificaciones consisten en el aumento de la cantidad de bombas de agua de alimentación de emergencia, de tres a cinco, y de una a dos las líneas del ECCS; la instalación de bombas adicionales del ECCS (tres para refrigerar la parte dañada del núcleo y tres para la parte no dañada) y las tres divisiones conexas de tuberías; la instalación de válvulas de retención entre los colectores del grupo de distribución y el colector de descarga de la bomba de refrigeración principal; y la instalación de acumuladores de gran capacidad.

**Sistema de localización de accidentes.** Los RBMK están protegidos por un sistema de localización de accidentes (ALS). Este sistema de supresión de la presión abarca parte del circuito de circulación principal y está compuesto por compartimientos a prueba de fugas. Todos los principales colectores, tuberías, y componentes que transportan agua de refrigeración forman parte del ALS. En cuanto a diseño, el ALS difiere considerablemente de una central a otra. El sistema de refrigeración del reactor de los RBMK de primera generación no está encerrado en un ALS a prueba de fugas, como sucede en los otros RBMK. Así y todo, incluso en estos otros RBMK, sólo parte del circuito de refrigeración del reactor está confinado por un ALS de compartimientos a presión.

**Sistema de protección contra la sobrepresión en la cavidad del reactor (RCOPS).** Esta es una parte importante del sistema de seguridad de los RBMK. Se supone que la causa de la sobrepresión sea un fallo de los tubos de presión dentro de la cavidad del reactor. El alivio se logra mediante tubos que conectan la cavidad del reactor al ALS por medio de una esclusa de agua. El accidente base de diseño de los análisis de la seguridad de los RBMK es la rotura de un tubo. El sistema tiene capacidad para hacer frente a dos o tres roturas de los tubos de canal (para las unidades de la primera y la segunda generación, respectivamente) lo que refleja un margen de seguridad sobre el accidente base de diseño. En el caso de las unidades de primera generación, el sistema de descarga de vapor da salida a una mezcla de vapor/gas que va de la cavidad hacia un condensador, luego el gas queda contenido y se libera por conducto del tubo de aireación.

Para mejorar la capacidad del RCOPS, se está trabajando por etapas en todas las unidades. En Smolensk-3, el sistema existente ya tiene capacidad para hacer frente a la rotura simultánea de hasta nueve tubos de presión, partiendo de hipótesis conservadoras de roturas simultáneas.

dad y mejoras de seguridad. Otro aspecto es asegurar que la documentación de diseño pertinente se vaya actualizando a medida que se modifica y mejora la configuración de la central. Por consiguiente, es de suma importancia que la estructura orgánica promueva la comprensión de los problemas de seguridad, reaccione con rapidez para evaluar dichos problemas y aplique oportunamente medidas correctoras si están justificadas.

Corresponde a la organización explotadora y al órgano regulador decidir exactamente cómo y cuándo solucionar los problemas de seguridad ya determinados. El objetivo de los exámenes de seguridad del OIEA es ayudar, proporcionando servicios de expertos internacionales que colaboren en este proceso. Los exámenes se sirven de las publicaciones NUSS del OIEA, las regulaciones rusas y las prácticas nacionales. El único propósito de las recomendaciones y conclusiones es establecer otra base técnica para las decisiones encaminadas a aumentar la seguridad de los RBMK. Las autoridades nacionales son los responsables supremos de la reglamentación y la explotación segura de sus centrales nucleares. Por consiguiente, los resultados de los exámenes no sustituyen la evaluación integral de la seguridad que es preciso realizar en el marco del proceso nacional de concesión de licencias.

## Panorama de las conclusiones técnicas

**Diseño y vigilancia del núcleo.** Puesto que las causas directas del accidente de Chernobil estuvieron relacionadas con el diseño del núcleo del reactor, las mejoras de seguridad se han centrado inicialmente en las deficiencias detectadas en relación con la física del núcleo.

Hasta la fecha se ha trabajado mucho para reducir el coeficiente de reactividad en vacío del núcleo y aumentar la eficiencia del sistema de parada. Así y todo, aún quedan por resolver problemas importantes, como el de la reactividad en vacío asociada a la pérdida de refrigerante procedente de los canales del sistema de control y protección (CPS), y el problema de la parada independiente y diversa del reactor. Es por ello que los expertos internacionales dan su total apoyo a la intención de los diseñadores rusos de desarrollar y modernizar el CPS de los RBMK a fin de aumentar el nivel de seguridad.

Otra cuestión de gran importancia para la seguridad es la relativa al margen operacional de reactividad (ORM). Es preciso controlar el ORM para mantener el coeficiente de reactividad en vacío, la eficacia del sistema de parada y la distribución de la potencia dentro de límites de seguridad definidos. Con el diseño actual, el explotador es el único responsable de mantener el ORM dentro de los límites correspondientes. Los expertos del programa del OIEA han recomendado la automatización de las paradas cuando el valor del ORM sea inferior a los límites de seguridad.

Otros aspectos importantes son el proceso de análisis del diseño y de la seguridad de los RBMK. Estos análisis se hicieron con las técnicas de cálculo a la sazón existentes. Estas técnicas (por ejemplo, códigos de computadora) por lo general no permitían

elaborar de manera adecuada modelos de las interacciones espaciales entre la neutrónica y la termodinámica. Por consiguiente, se está tratando de formular métodos tridimensionales para analizar los campos neutrónicos, la densidad del refrigerante y la distribución de la temperatura del combustible y el grafito. Los expertos del programa del OIEA han recomendado el empleo de estos métodos para confirmar los resultados de análisis anteriores de la seguridad, así como para nuevos estudios.

**Instrumentación y control (I y C).** Las principales inquietudes giraban en torno a la segregación de los sistemas electrónicos y el nivel de diversidad presente en los sistemas y equipos más importantes. Por ejemplo, el sistema de control de flujo tiene muchos elementos comunes con el sistema de parada. Aunque la capacidad de recuperación del sistema es considerable debido al elevado nivel de redundancia, los dos sistemas serían vulnerables a fallos debidos a una causa común, y, por consiguiente, el control y la protección podrían perderse simultáneamente. El sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS) se activa mediante una combinación de señales. Sin embargo, no hay suficiente seguridad de que el sistema responda rápidamente ni de que el equipo de accionamiento esté diseñado para evitar fallos únicos.

Un problema de seguridad clasificado como "medio" es la sustitución de las computadoras principales de la central. La situación varía de un emplazamiento a otro. Por ejemplo, el equipo de Ignalina está dando señales claras de envejecimiento, ya que el calor ha retorcido los tableros y ha fragilizado los conectores de borde plásticos.

Una serie de otros problemas relacionadas con I y C podrían mitigarse mediante la adopción de medidas locales en la central, como, por ejemplo, los procedimientos de prueba y mantenimiento y el registro y empleo de información sobre fallos.

**Integridad del confinamiento a presión.** Algunos componentes y tuberías del circuito primario de refrigeración se encuentran fuera del sistema de localización de accidentes. En los RBMK de la primera generación, una rotura de cizalla en las tuberías puede provocar daños en las estructuras civiles. La aplicación del concepto de fuga producida antes de la rotura reduciría el riesgo de fallos en el circuito primario de refrigeración. Se están llevando a cabo trabajos para demostrar la aplicabilidad de este concepto en las condiciones de los RBMK y para aplicar el método y las técnicas.

Hasta la fecha, se han producido tres roturas de canal único debido a obstrucción del flujo de agua o a desequilibrio en la relación flujo-potencia. Por consiguiente, se recomienda que se analice y se ponga en práctica, en la medida en que resulte factible, la reducción del número de componentes en línea, cuyo fallo puede obstruir la corriente de agua.

Los exámenes de la seguridad realizados en el marco del programa del OIEA indican que algunas centrales han seguido funcionando aun cuando no se realizan los exámenes en la cantidad y con la frecuencia que exigen las regulaciones nacionales para el confinamiento a presión del reactor, o cuando los resultados no han sido satisfactorios. En ocasiones no se cumplen los plazos vigentes para la introducción de

las modificaciones, la realización de análisis adicionales y el mantenimiento de los registros requeridos. No se han establecido criterios para limitar el funcionamiento de las centrales en estos casos.

El volumen de inspecciones necesario durante el servicio requerido no se cumple en la práctica. Se comprobó que en algunos casos no se había inspeccionado el número de canales de combustible requerido. El método adoptado en las centrales RBMK para corregir los defectos críticos que se detectan difiere del método de pronóstico que se aplica en las inspecciones durante el servicio en otras partes. No se llevan registros de las inspecciones previas a la puesta en servicio ni los registros de pronóstico de las inspecciones durante el servicio. El equipo existente y los procedimientos vigentes son inadecuados para dar mediciones reproducibles de pequeños defectos por debajo del tamaño crítico.

**Análisis de accidentes.** El alcance del análisis de accidentes hipotéticos existente en la justificación técnica de la seguridad (TOB) de los RBMK quedó determinado por las regulaciones nacionales en vigor cuando se emitió la TOB. En comparación con las prácticas actuales, se comprobó que era limitado y que la información conexa no suele ofrecer una descripción clara de las hipótesis utilizadas en el análisis. Los códigos de computadora empleados cuando se diseñaron los RBMK tenían posibilidades limitadas para la elaboración de modelos. La falta de una base de datos experimental sobre rotura de tuberías del sistema primario de transferencia de calor limitaba la posibilidad de validación integral de los códigos. Ahora se están empleando códigos rusos más modernos y algunos códigos occidentales, pero éstos no han sido suficientemente validados para la elaboración de modelos de RBMK.

En el examen también se detectaron varias esferas incompletas, incluido el análisis de accidentes base de diseño; la idoneidad de los códigos, la base de datos, la validación y la documentación para el análisis de accidentes con pérdida de refrigerante; y la sensibilidad a variaciones e incertidumbres en los parámetros. Además, los transitorios previstos sin parada de emergencia (ATWS) se consideraron de gran trascendencia para la seguridad y es preciso realizar el análisis de estos sucesos.

El carácter cabal de estos análisis tiene suma importancia para garantizar el diseño seguro de las centrales. El análisis debe identificar posibles deficiencias de diseño actual y realizarse con métodos modernos y habilitados. También es preciso actualizar los análisis a medida que se vayan introduciendo cambios en el diseño de las centrales. Ejemplo de este proceso son los trabajos para el Informe de Análisis de la Seguridad (SAR) que se están efectuando en la central de Ignalina.

Un instrumento útil para identificar las deficiencias y priorizar las mejoras es la evaluación probabilista de la seguridad (EPS). Por consiguiente, para cada RBMK se recomienda realizar una evaluación probabilista de la seguridad específica de cada central y un examen por homólogos.

**Sistemas de seguridad y de apoyo.** En términos generales se ha observado que la elevada redundancia que existe en varios de los sistemas de seguridad de

primera línea no está presente en la misma medida en los sistemas de apoyo, como el agua de servicio y los sistemas de refrigeración intermedios. Además, no siempre se puede dar total crédito al elevado nivel de redundancia de los sistemas de seguridad por los fallos debidos a causa común.

La fiabilidad de los sistemas de seguridad depende del diseño y la alineación de los sistemas y de parámetros operacionales, tales como los procedimientos de mantenimiento y prueba y los procedimientos de explotación en situaciones de emergencia. Por consiguiente, es preciso mantener estrechos vínculos entre esta esfera y el desarrollo de procedimientos de explotación en situaciones de emergencia y de prueba.

En general, se ha determinado que las diferencias entre las centrales son tan grandes que es necesario evaluar las recomendaciones en esta esfera atendiendo a cada central.

**Protección contra incendios.** La protección pasiva contra incendios puede resolver de manera eficaz los problemas de seguridad relacionados con los incendios. La protección pasiva contra incendios comprende todas las medidas que se toman antes de comenzar la explotación y que no se espera requieran ninguna acción humana ni mecánica en caso de incendio. La prevención de daños por incendio se basa en la reducción al mínimo de la cantidad de materiales consumibles y el potencial incendiario. Si bien es preferible eliminar totalmente los materiales consumibles, cuando ello no es posible hay que segregarse el potencial incendiario en diferentes compartimientos contra incendios. La segregación en compartimientos se basa en mantener el equipo significativo desde el punto de vista de la seguridad separado entre sí, así como de las sustancias peligrosas. Los elementos de separación de los compartimientos deben consistir en barreras contra incendio fijas como paredes, pisos, techos y precintos de penetración mecánicos y eléctricos. Dentro de los propios compartimientos, es posible que haya elementos importantes que también requieran separación contra incendios, lo que se logra distanciándolos entre sí o colocándoles elementos de separación locales.

Los riesgos de incendio no se tuvieron en cuenta correctamente en la fase de diseño de los RBMK, cuando las medidas pasivas podrían haberse introducido fácilmente. No obstante, después se ha trabajado mucho sobre el particular. Se ha comenzado gradualmente a eliminar el mayor potencial incendiario, o sea, el revestimiento plástico del suelo. Se ha mejorado la separación en compartimientos, perfeccionando las puertas contra incendio y los precintos de penetración. Dentro de los compartimientos, la principal mejora ha sido el recubrimiento de los cables con una capa protectora resistente al fuego.

Estos problemas ya se han resuelto hasta cierto punto en algunas unidades RBMK. En otros casos, se han resuelto mediante la modernización del diseño, programas nacionales de mejoramiento o programas de asistencia bilateral o internacional.

En todas las áreas de la central donde haya materiales consumibles hay que colocar equipo de detección de incendios conectado a un sistema de alarma adecuado. Hay que ampliar los sistemas existentes y

mejorar su calidad. Algunas centrales han comenzado a aplicar estas medidas como parte de su propio programa de mejoramiento, y otras en relación con programas financiados bilateral o internacionalmente.

La capacidad de extinción de incendios por medios manuales suele ser muy buena en las centrales nucleares de la antigua Unión Soviética, en lo que se refiere a la cantidad y formación del personal de las brigadas contra incendios. Con todo, existen deficiencias en cuanto al equipo de protección personal, el equipo de comunicaciones y el equipo de extinción de incendios, como extintores, mangueras y toberas.

La extinción automática de los incendios se efectúa fundamentalmente mediante sistemas fijos de aspersión de agua y anegamiento. También existen sistemas locales de extinción que emplean dióxido de carbono o espuma. Es preciso evaluar la fiabilidad y suficiencia de los sistemas existentes. En algunos compartimientos que hasta ahora no han estado totalmente protegidos hay que incluir sistemas automáticos fijos de extinción por agua.

El abastecimiento fiable de agua asegura la disponibilidad y el funcionamiento correctos de las capacidades manual y automática de extinción de incendios. Con todo, las diferencias entre los emplazamientos y las diferentes generaciones de RBMK son grandes y es necesario adoptar medidas de distinta magnitud.

**Seguridad operacional.** La experiencia adquirida en la explotación de las centrales nucleares confirma la importante función que desempeña el personal de la central para garantizar la seguridad nuclear. Se ha prestado considerable atención al estudio de los factores humanos en la explotación de centrales. En términos generales, se ha observado que la seguridad operacional de los RBMK puede mejorarse en cuestiones como la capacitación de los explotadores; los

procedimientos de explotación y de gestión de emergencias; y la vigilancia, el mantenimiento y el control de las modificaciones de las centrales. En estas esferas se han hecho recomendaciones que deben llevarse a la práctica paralelamente con las mejoras de diseño y seguridad propuestas.

### Una base técnica más sólida

Sobre la base de los exámenes de la seguridad a nivel nacional y multilateral, se han determinado los principales problemas de seguridad de las centrales nucleares RBMK más modernas y se han acordado las mejoras de seguridad necesarias.

Pese a la labor realizada hasta la fecha, sigue habiendo preocupaciones en materia de seguridad, en particular en relación con las unidades de la primera generación. Las actividades del OIEA en el futuro se centrarán en la prestación de asistencia para el examen de las unidades de la primera generación y la racionalización de las actividades destinadas a resolver las cuestiones genéricas de seguridad.

Es imprescindible disponer de información actualizada sobre la situación de los RBMK en funcionamiento en cada central, a fin de establecer un intercambio eficaz de información técnica y coordinar las actividades nacionales e internacionales para aumentar la seguridad nuclear. La base de datos creada por el OIEA es un instrumento eficaz para facilitar esta coordinación. La labor futura permitirá reunir más información sobre cada central con el objetivo de seguir de cerca la situación de las mejoras en materia de seguridad y determinar las esferas en las que es necesario desplegar mayores esfuerzos.



Participantes en el examen de la seguridad en la central de Smolensko ejecutado en el marco del programa extrapresupuestario del OIEA relativo a la seguridad de los RBMK.