

**Direcciones futuras**

El EPRI y el DOE trabajan en conjunto para crear este programa de seguimiento de las centrales pasivas ALWR. El DOE sigue realizando un gran esfuerzo para obtener la certificación del diseño de centrales pasivas, lo que dependerá de la participación de la industria en la financiación de los gastos. El EPRI y el comité directivo de compañías eléctricas del ALWR están estableciendo la estructura de una sociedad internacional de compañías eléctricas que trabajarán de forma conjunta para apoyar el diseño y el desarrollo de reactores ALWR pasivos que sean estables. El objetivo de este programa coordinado será promover los diseños de centrales pasivas existentes hasta el punto en que sean considerados "listos para la inversión". En términos más concretos, en la tercera fase se logrará:

- un conjunto de requisitos de reglamentación estables y de amplia aceptación, confirmados mediante la certificación por parte de la NRC de uno o más diseños de centrales pasivas;
- un documento de requisitos, aprobado por las compañías eléctricas y confirmado por la NRC, en que se establezcan los requisitos de diseño de las compañías eléctricas estadounidenses e internacionales;
- planes de construcción detallados que sirvan de apoyo al calendario de 36 meses previsto para la construcción de las centrales nucleares pasivas;
- análisis probabilistas de riesgos (APR) y análisis de accidentes que demuestren que se han cumplido los objetivos de prevención de accidentes y reducción de sus efectos;
- una interfaz hombre-máquina bien definida mediante el análisis funcional de sus tareas.

Como parte de la tercera fase, las compañías eléctricas facilitarán los recursos técnicos y financieros necesarios para su aplicación directa en la labor de diseño de las centrales pasivas.

El EPRI y los actuales participantes en el programa ALWR están enfrascados en la estructuración de esta importante fase. Esta labor se está coordinando estrechamente con un importante programa patrocinado por el DOE destinado a apoyar la certificación de los diseños de centrales y en general se observa entusiasmo, vigor y grandes esperanzas con respecto a esta nueva fase.

En conclusión, en todo el mundo se han desarrollado ingentes esfuerzos para elaborar los requisitos y los diseños de los reactores de agua ligera avanzados de carácter pasivo. Estos diseños prometen ser técnicamente más sencillos y competitivos en función de los costos si se comparan con las centrales actuales. Se espera que sirvan de base para un programa de energía nucleoelectrónica reactivado y extendido en los Estados Unidos y en todo el mundo.

## Mejoras en los actuales reactores de agua ligera

*Panorama sobre los requisitos de las centrales y las tendencias globales*

por P.-J. Meyer y W. Grüner

Los reactores nucleares se han apropiado de una parte sustancial del mercado mundial de generación de electricidad, y durante 1988 suministraron aproximadamente el 17% de la electricidad total generada. A finales de 1988, de las 429 centrales nucleares en explotación a nivel mundial, 320 estaban dotadas de reactores de agua ligera LWR con una capacidad total de más de 263 gigavatios eléctricos (GWe), o sea, alrededor del 85% de los casi 311 GWe de capacidad nuclear total instalada en la actualidad. De las 105 centrales nucleares en construcción, 79 consisten en LWR. Estas cifras evidencian claramente que actualmente los LWR, incluidos los reactores de agua a presión (PWR) y de agua en ebullición (BWR), soportan prácticamente el peso de la contribución de la energía nucleoelectrónica a la producción de energía eléctrica. Países como los Estados Unidos, la URSS, Francia, la República Federal de Alemania, el Japón, la República de Corea y muchos otros han optado por los LWR debido a su alta fiabilidad comprobada y su viabilidad económica.

Como resultado de este despliegue, se dispone de varios miles de años de experiencia operacional para sustentar el desarrollo futuro. Las tendencias de desarrollo incluyen mejoras de tipo evolutivo en los diseños actuales, que redundan en simplificaciones en el diseño de los sistemas, reducciones en el plazo de construcción, mantenimiento más simple, optimización del diseño del núcleo, mejoras en la capacidad operacional y la fiabilidad, así como reducciones en los gastos de construcción, combustible, explotación y mantenimiento. En los Estados Unidos se están estudiando conceptos de reactor para centrales pasivas de gran tamaño (1200 MWe) de tipo evolutivo y de menor tamaño (600 MWe), teniendo en cuenta requisitos de diseño que incluyen los objetivos económicos trazados por el Electric Power Research Institute (EPRI) tras varios años-hombre de labor conjunta entre las empresas contratistas y las empresas eléctricas.

Los programas de desarrollo, estén relacionados con el diseño, con la construcción o con la explotación, se basan fundamentalmente en tecnologías bien comprobadas y fiables que facilitan a los explotadores y a las autoridades la concesión de licencias para la nueva

El señor Meyer es Director Adjunto y el señor Grüner es Director Superior del Grupo Siemens AG KWW en Erlangen, República Federal de Alemania.



generación de LWR. Incluso en los conceptos de reactores de menor tamaño, diseñados conforme a los requisitos del EPRI, se utilizan sistemas y componentes que tienen su referencia en otras centrales. La mayor parte de los requisitos abordan problemas que han afectado a la planificación, la construcción y la explotación.

### **Características de las centrales actuales**

A fin de evaluar debidamente la situación actual de las centrales frente a las propuestas de desarrollo de una nueva generación de centrales, hay que establecer un criterio de referencia con el cual comparar el grado de innovación o de progreso alcanzado en cuanto a la seguridad y el carácter competitivo de las nuevas centrales en el plano económico.

Los nuevos conceptos de diseño exigen mejoras en las posibilidades de construcción y explotación y en la seguridad. Por supuesto, como ocurre con todo nuevo producto que se ha de introducir en el mercado, tales exigencias deben compararse con el nivel tecnológico más avanzado disponible en cada una de estas esferas. Los últimos adelantos se ilustrarán tomando algunos ejemplos de las centrales Convoy recientemente concluidas en Alemania. Las tres centrales Convoy, de PWR de 1300 MWe, cuya explotación industrial comenzó recientemente, fueron entregadas a sus usuarios con arreglo al presupuesto original y con una antelación al calendario contractual de 4 meses como promedio cada una, lo que demuestra la gran eficacia de las medidas que se adoptaron sólo para estabilizar la ejecución del proyecto, incluso ante el desfavorable cambio de actitud del público con respecto a la energía nucleoelectrica. Si se incluyen sucesos especiales como las interrupciones por orden judicial, al parecer se puede construir fácilmente una unidad de 1300 MWe de grandes dimensiones en un período de 4,5 años. Teóricamente, tal vez sería factible construir centrales de menor tamaño en algo menos de 4,5 años teniendo en cuenta la cantidad de equipo y el volumen de hormigón menores que se necesitarían.

Estos calendarios de construcción cortos, que también se han observado en Francia y el Japón para estas unidades u otras similares, se pueden lograr mediante una normalización cabal y pormenorizada de componentes que aunque son de gran tamaño, imponen mucho gasto y uso de mano de obra, como por ejemplo, las válvulas, los sistemas de tuberías, los soportes, las piezas embebidas en hormigón y las escaleras portables. Estos componentes, que se instalan en grandes cantidades en las centrales nucleoelectricas conforme a estrictos requisitos de calidad, se han reducido a limitadas cantidades y combinaciones de tipos y tamaños. Asimismo, se han ensamblado mediante bases de datos computadorizadas con las cuales se han preparado, de manera coherente e íntegra, todos los documentos relativos a la adquisición, la fabricación, la construcción y el control de calidad.

Una capacidad de funcionamiento satisfactoria entraña la explotación ininterrumpida de la central durante los transitorios internos y externos, flexibilidad en la demanda posterior a la carga y períodos de revisión breves. Durante los últimos 8 años, se han logrado sis-

temáticamente tasas bajas de paradas imprevistas de la central, a saber, de aproximadamente una por año-reactor. Mediante un sistema de control especial se puede lograr capacidad de adaptación automática de la carga en condiciones especiales de la red, como el ajuste de la potencia de salida debido a fluctuaciones de la potencia o a requisitos de control de la frecuencia, así como el funcionamiento continuo en caso de interrupción de una de las bombas principales del refrigerante primario. Este sistema se inserta entre el sistema de control normal y el sistema de protección del reactor, y cumple la función de estabilizar el transitorio que presenta parámetros fuera del ancho normal de la banda de control.

Aunque los períodos de revisión breves se pueden atribuir a la minuciosa labor preliminar del explotador, éstos los facilitan diversas características que el diseñador incorpora a la central. Los principales ejemplos de esas características son la accesibilidad de la contención durante la explotación, la piscina de combustible que se encuentra en el interior de la contención, un número muy reducido de soldaduras sujetas a inspección en el servicio y el empleo de equipo muy perfeccionado para las labores de mantenimiento e inspección.

Actualmente, los diseños de reactores de agua poseen características pasivas de seguridad e incluso se ha hecho más hincapié en la aplicación de principios de seguridad pasiva en la creación de nuevos conceptos de reactor. No obstante, todo reactor depende de un conjunto de características de seguridad inherente, así como de dispositivos activos y pasivos de seguridad para garantizar elevadas normas de seguridad globales y la defensa en profundidad contra todos los sucesos concebibles. Los diversos componentes de estos elementos de seguridad pueden variar en los distintos diseños y algunos utilizan de manera más eficaz las características pasivas.

La concesión de licencias es un aspecto importante de la seguridad y tiene sentido proseguir el desarrollo del diseño de manera gradual, teniendo en cuenta los antecedentes de diseños bien comprobados, de elevada fiabilidad y autorizados. En el caso de conceptos de seguridad innovadores, la concesión de licencias depende en gran medida del clima político imperante al respecto en el país de que se trate y de la idoneidad convenida de todas las características de seguridad para cumplir los requisitos establecidos.

### **Requisitos de las centrales futuras**

Las perspectivas de los futuros conceptos de reactor varían considerablemente entre los diferentes países. En Francia y la República Federal de Alemania se ha desarrollado una tecnología altamente normalizada, comprobada y fiable que cuenta con un excelente historial de explotación.

Basada en su tecnología Convoy, la República Federal de Alemania prevé introducir mejoras futuras en la próxima generación de PWR. Electricité de France (EdF) observará el mismo principio en su programa de tipo evolutivo perfeccionando el diseño sin introducir cambios significativos. La EdF comenzó un estudio denominado "REP 2000" para definir las normas

futuras de los PWR de Francia en el año 2000 y con posterioridad. El estudio persigue los objetivos siguientes: capacidad de seguimiento de carga, eficacia en función de los costos y flexibilidad operacional. Para aumentar aún más la utilización del combustible en los PWR, las tres empresas copartícipes francesas (Commissariat à l'énergie atomique, EDF, y Framatome) han comenzado a aplicar conjuntamente un programa conjunto para evaluar la viabilidad del reactor convertible por corrimiento espectral, RCVS. Se prevé que no se concluirá ningún RCVS antes del 2002 o el 2005 ni se emprenderán estudios de diseño exhaustivos antes de principios de los años noventa.

En el Japón, el desarrollo de los PWR y BWR de gran tamaño está bien avanzado; la Mitsubishi-Westinghouse diseña los APWR y la Hitachi-Toshiba-General Electric, los ABWR. La Tokyo Electric Power Company ha seleccionado el ABWR para las dos unidades futuras del emplazamiento de Kashiwazaki-Kariwa. En el Japón no se logrará el desarrollo técnico de la próxima generación de LWR antes del 2005. Para responder a las necesidades sociales y económicas futuras, esta nueva generación estará destinada a mejorar aún más las funciones del núcleo del reactor, incluidos el uso de conjuntos combustibles MOX, un mayor rendimiento del combustible, la mejora de las técnicas de diseño de seguridad, la utilización de tecnologías más avanzadas y el perfeccionamiento de la tecnología asísmica.

Los aspectos relativos a la seguridad han desempeñado un destacado papel desde el comienzo de la construcción y la explotación de las centrales nucleares y lo siguen haciendo, y sirven de apoyo a una sólida red de control y vigilancia por intermedio de órganos reglamentadores y organismos internacionales que basan su labor en la aplicación de conjuntos muy amplios de códigos, normas y reglamentos a nivel nacional e internacional. En el caso de las centrales nucleares, las disposiciones de seguridad requeridas para limitar los riesgos para la salud y la seguridad públicas a un nivel aceptable se determinan en prolongados y minuciosos procedimientos de concesión de licencias integrados por audiencias públicas, a las que siguen con mucha frecuencia litigios en los tribunales administrativos. No obstante, la opinión pública, sobre todo a partir del accidente de Chernobyl, ha mantenido una posición muy cautelosa con respecto a la energía nucleoelectrica, pues la percepción del público con relación al riesgo inherente a la energía nuclear difiere considerablemente del nivel real.

Es difícil determinar qué características de seguridad contribuirán a una mayor aceptación social en el futuro cercano, pero se considera que los criterios siguientes apuntan en la dirección correcta:

- Las centrales existentes deberán seguir funcionando satisfactoriamente, ya que el aprovechamiento del creciente caudal de experiencia operacional es un elemento fundamental para la seguridad de la central.

- Dada la antigüedad de las centrales en explotación —cerca de la mitad de las centrales nucleares de la República Federal de Alemania tienen menos de 10 años de antigüedad— y tomando en cuenta la posibilidad en estudio de prolongar su vida útil, durante varios decenios las nuevas centrales tendrán que coexistir con las más antiguas con conceptos de seguridad compatibles.

- Los nuevos diseños, en especial si se instalan en nuevos emplazamientos, deberán estar en condiciones de mitigar en el perímetro de la central las consecuencias de los accidentes que rebasen la base de diseño de la central, por lo que no será preciso adoptar medidas de emergencia en los alrededores.

Estos criterios bastante genéricos no podrán traducirse en directrices más específicas para los proyectistas sólo en el plano nacional. De hecho, las consecuencias de Chernobyl han aumentado en gran medida la comprensión de que la seguridad nuclear constituye verdaderamente una preocupación internacional. La mejora ulterior de la seguridad de las centrales tendrá que llevarse a cabo de manera coordinada a través de las fronteras nacionales. Sin duda, después de 1992 ello será un hecho en la Comunidad Europea, donde tendrá que establecerse un consenso en cuanto a los códigos y normas aplicables, al menos con respecto a las consecuencias ambientales de las centrales nucleares durante las operaciones normales y en condiciones adversas inusitadas. Cabe esperar que los países miembros de la Comunidad que de hecho no utilizan la energía nucleoelectrica, también deseen ser consultados en este proceso de armonización.

El aumento de su participación en el mercado de la electricidad en casi un factor de 4 (del 10 al 40%) durante los últimos 10 años es la prueba más fehaciente de la competitividad económica de la energía nuclear en la República Federal de Alemania. Es probable que después de 1992 se introduzcan cambios en el mandato del mercado de energía alemán, ya que entre los objetivos de la Comunidad Europea se incluye la supresión de reglamentaciones y la eliminación de los obstáculos que se oponen al intercambio de bienes y servicios en el seno de la Comunidad. Todo parece indicar que la posibilidad de pronosticar los precios de la energía en el mercado mundial no será mucho mejor que en el pasado, de modo que en la Comunidad debería fijarse un objetivo preliminar prudente para los gastos de generación al nivel más bajo previsto. Por tanto, es probable que éste se represente con el costo de la energía nuclear en Francia, donde la racionalización temprana del tipo de centrales y su producción en serie ha contribuido a alcanzar el actual volumen de exportación.

No obstante, los países que poseen redes eléctricas más pequeñas también prevén la energía nuclear como posible opción. Como algunos de estos países no cuentan con suficientes recursos energéticos autóctonos, se ven obligados a importar la energía. Estos países podrían definirse como usuarios potenciales de centrales nucleares más pequeñas para estabilizar el futuro mercado de la energía. Además del aspecto de los bajos costos de generación, también reviste vital interés el reducido presupuesto que se requiere para las centrales más pequeñas en comparación con las unidades de gran tamaño. Por otra parte, la introducción de la energía nuclear en un plan nacional de desarrollo energético produce varios efectos colaterales. Durante la construcción, es preciso realizar múltiples y diversos trabajos industriales cualificados. Más tarde, durante la fase de explotación, es necesario disponer de una industria de servicios bien equipada y sumamente eficaz que garantice el funcionamiento fiable de la planta a largo plazo.

## Tendencias del desarrollo ulterior

Tras haber establecido mediante algunos ejemplos el mandato relativo a los últimos adelantos tecnológicos de los LWR, se tomaron en cuenta las esferas más prometedoras del desarrollo ulterior de la energía nucleoelectrónica. Sobre la base de las tendencias generales mencionadas, cabe prestar aún más atención a los aspectos siguientes:

- La reducción considerable del plazo y los gastos de construcción exige que se disponga de un conjunto completo y normalizado de documentos de planificación y construcción con mucha antelación al comienzo real de la construcción. Reviste gran importancia la normalización de los sistemas y componentes con los trabajos de ingeniería correspondientes que se concluyan para toda la central, así como los planos de construcción, los procedimientos para la entrada en servicio y la documentación.
- Los principales incentivos para optimizar aún más el uso del combustible y el diseño del reactor e introducir mejoras especiales en los métodos de gestión del combustible dimanar de los objetivos siguientes: 1) la reducción del costo del ciclo del combustible mediante: a) el aumento del grado de quemado medio de descarga hasta 45 a 50 megavatios-día por kilogramo de uranio para los PWR, y b) una mayor utilización del uranio mediante la optimización del diseño y la aplicación de estrategias avanzadas de gestión intranuclear; 2) el aumento de la flexibilidad operacional mediante el diseño del núcleo y la central para a) una duración flexible del ciclo de hasta dos años; b) una capacidad de fraccionamiento; c) el cabal cumplimiento de los requisitos actuales y futuros en cuanto a la operación de seguimiento de carga de 10% por minuto en un alto rango de potencia; y 3) el ahorro de los recursos de uranio natural y la ulterior promoción de la tecnología de reelaboración para facilitar el reciclado del plutonio. Las diversas medidas que se requieren para lograr estos objetivos están vinculadas entre sí, de modo que es preciso evaluar y optimizar de manera minuciosa y global todos los factores favorables.
- Ya se dispone de medidas de vigilancia preventivas del confinamiento a presión primario mediante la combinación e integración adecuadas de diversos sistemas de vigilancia; dichas medidas abarcan diversos aspectos, como los escapes, las vibraciones, la fatiga y las piezas desprendidas. La información que se obtenga al respecto ampliará los plazos de mantenimiento preventivo y aumentará la fiabilidad del confinamiento a presión.
- Los márgenes establecidos en el diseño de las medidas técnicas de protección deberán revisarse tomando en cuenta el aumento del caudal de conocimientos adquiridos en los trabajos de investigación y desarrollo relacionados con la seguridad que han llevado a cabo varias instituciones en la esfera de la cooperación internacional durante los últimos años.
- Los resultados así obtenidos se podrán incorporar a la labor permanente que se lleva a cabo en materia de procedimientos de gestión de accidentes que rebasen la base de diseño. En la actualidad se estudia la posibilidad de prolongar el período de gracia del personal de explotación a fin de tomar medidas en caso de un transitorio de desviación del funcionamiento normal que

sobrepase el valor actual de la base de diseño de 30 minutos.

- La vigilancia de la central durante los transitorios y la movilización de sus recursos a efectos de adoptar contramedidas adecuadas hace que sea indispensable disponer de información completa y correcta sobre el estado de la central. Se han logrado progresos en la interfaz hombre-máquina mediante un sistema de información de procesos que se introdujo por primera vez en las centrales Convoy. Por medio de las unidades interactivas de representación visual de video, el sistema procesa y concentra toda la información pertinente acerca de los parámetros de la central en formas más convenientes para el personal de explotación de servicio. También se sigue desarrollando la digitalización integral.

- La evaluación minuciosa de las posibilidades de introducir elementos pasivos en las medidas técnicas de protección junto a una labor cabal encaminada a la simplificación puede proporcionar ventajas en lo relativo al mantenimiento y, por tanto, a la exposición a las radiaciones y posiblemente a la disponibilidad.

En lo que atañe a la construcción y la explotación, la labor de desarrollo futura se concentrará en el mantenimiento y mejora de la ventaja económica de la energía nucleoelectrónica frente a las condiciones cambiantes del mercado de la energía. El acortamiento del plazo de construcción y la prolongación de los ciclos de explotación entre revisiones constituyen las perspectivas más alentadoras.

## Mercado internacional

Cabe esperar que en el próximo decenio aumente la generación de energía eléctrica de las centrales nucleares tanto grandes como pequeñas. En varios países se llevan a cabo estudios de planificación de emplazamientos, y concesión de licencias de ingeniería, en espera del momento en que los planes de ampliación de la red eléctrica requieran que se aumente la capacidad. Para racionalizar sus actividades de comercialización, recientemente la Framatome y la Siemens han acordado crear una empresa mixta que se encargará de la comercialización internacional de una nueva central nuclear. En el Japón, el desarrollo conjunto de los APWR y los ABWR ha continuado con la cooperación de los vendedores estadounidenses y sus concesionarios japoneses.

Por el momento, el mercado internacional de las futuras centrales se encuentra en una fase de estancamiento dada la insuficiente evolución de la demanda de energía a corto plazo en la mayor parte de los países industrializados. Por otra parte, los países en desarrollo, que han previsto o prevén altas tasas de crecimiento de la demanda de energía, no pueden financiar las instalaciones nucleares o tienen limitaciones presupuestarias para los próximos años. Por consiguiente, la tarea principal que se ha de llevar a cabo para promover la energía nuclear no puede ser únicamente la solución de problemas técnicos, sino la elaboración de modelos de financiación que permitan resolver este problema internacional.