

Proyecciones de crecimiento y tendencias de desarrollo de la energía nucleoelectrica

La "nueva generación" de diseños de reactores refleja la influencia de experiencias anteriores y las exigencias actuales

por B. Semenov, P. Dastidar, J. Kupitz y A. Goodjohn

La población del mundo continúa en aumento y casi se ha duplicado durante el último tercio de siglo. El consumo mundial de energía ha aumentado con más rapidez aún, habiéndose cuadruplicado con creces durante el mismo período. Durante los últimos 15 años este aumento del consumo de energía en comparación con el crecimiento demográfico se ha venido registrando a un ritmo proporcionalmente más rápido en los países en desarrollo que en los países industrializados. (Véase la figura adjunta.) Esto indica claramente que el desarrollo inicial requiere crecientes cantidades *per capita* de energía en la medida que se hagan esfuerzos por lograr mejoras cuantitativas en el bienestar de un país y su población.

También en los países industrializados se hizo evidente la demanda proporcionalmente mayor de energía hasta la "crisis del petróleo" de comienzos de los años setenta. Desde entonces, y sobre todo en los países que dependen en gran medida del petróleo importado, la ética de conservación y eficiencia de la energía se ha convertido en un modo de vida y en el consumo anual de energía han tenido lugar aumentos relativamente menores, e incluso descensos en algunos países. No obstante, la tendencia sigue siendo positiva en general y se espera que continúe así.

Se han revelado otros factores interesantes. Las tasas de aumento del consumo total de electricidad, tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo, han sido claramente positivas, independientemente de cualquier crisis energética y, en magnitud, siempre han sido mayores que el simple aumento registrado en el propio consumo de energía. Durante los últimos 15 años esta tasa de aumento ha sido casi del 7% anual en los países en desarrollo y del 3% anual en los países industrializados. Estas últimas tasas estuvieron también en el orden del 7% anual hasta la crisis del petróleo de principios de los años setenta. De continuar, como se espera, estas tendencias de aumento en el consumo mundial de electricidad, en general, los recursos energéticos convencionales que se utilizan para generar electricidad, es decir, los recursos hídricos y los combustibles fósiles, se agotarán rápidamente. Además, los combustibles fósiles —carbón, petróleo y gas natural— que en estos momentos generan casi dos tercios de la

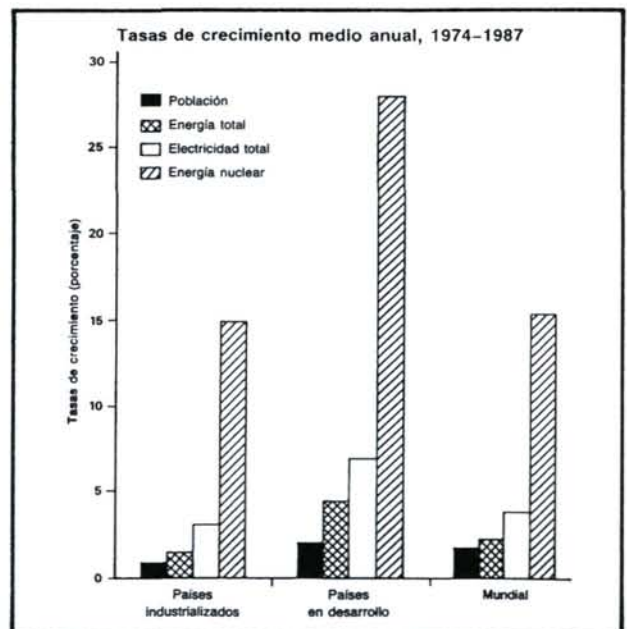
energía eléctrica mundial y contribuyen de manera significativa a aumentar las preocupaciones con relación a la contaminación ambiental, tienen también una diversidad de otros usos más singulares.

Se necesitan recursos energéticos no fósiles y los sistemas nucleares ofrecen una alternativa efectiva. De hecho, para el futuro inmediato, en espera de adelantos en las denominadas tecnologías blandas, es decir, en células fotovoltaicas eficaces en función de los costos, o en última instancia, en los prometedores sistemas de fusión, la fisión nuclear y los combustibles fósiles (sobre todo el carbón) son las únicas opciones realmente viables que pueden considerarse.

Situación de la energía nucleoelectrica

A pesar de las preocupaciones ya señaladas, la energía nucleoelectrica continuó avanzando a grandes pasos en 1988 a fin de satisfacer la creciente demanda mundial de electricidad. Esto se refleja en la situación mundial de las centrales nucleares en explotación y en construcción a fines de 1988, sobre la base de los datos de que dispone el Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (SIRP) del OIEA. (Véase el cuadro adjunto.)

En 1988 fueron puestos en servicio catorce nuevos reactores nucleares en ocho países, lo que elevó a 429 el número total de centrales nucleares en explotación a



El Sr. Semenov es Director General Adjunto del Departamento de Energía y Seguridad Nucleares del OIEA; el Sr. Dastidar es Director de la División de Energía Nucleoelectrica del OIEA; el Sr. Kupitz es funcionario superior de la División de Energía Nucleoelectrica; y el Sr. Goodjohn es consultor de la División.

Situación de la energía nuclear en el mundo (hasta el 31 de diciembre de 1988)

	En explotación		En construcción		Experiencia operacional (hasta el 31 de diciembre de 1988)	Electricidad suministrada por reactores nucleares en 1988	
	Nº de unidades	Total neto de MWe	Nº de unidades	Total neto de MWe		Años — Meses	TWe · h
Alemania, Rep. Fed. de	23	21 491	2	1 520	279-3	137,8	34,0
Argentina	2	935	1	692	20-7	5,1	11,2
Bélgica	7	5 480			86-7	40,6	65,5
Brasil	1	626	1	1 245	6-9	0,6	0,3
Bulgaria	5	2 585	2	1 906	43-8	16,0	35,6
Canadá	18	12 185	4	3 524	206-0	78,2	16,0
Cuba			2	816			
Checoslovaquia	8	3 264	8	5 120	44-1	21,7	26,7
China			3	2 148			
España	10	7 519	—	—	82-7	48,3	36,1
Estados Unidos	108	95 273	7	7 689	1261-10	526,9	19,5
Finlandia	4	2 310			39-4	18,4	36,0
Francia	55	52 588	9	12 245	488-1	260,2	69,9
Hungría	4	1 645			14-2	12,6	48,9
India	6	1 154	8	1 760	72-8	5,4	3,0
Irán, Rep. Islámica del			2	2 392			
Italia	2	1 120			77-10		
Japón	38	28 253	12	10 931	394-0	167,8*	23,4
México			2	1 308			
Países Bajos	2	508			35-9	3,5	5,3
Pakistán	1	125			17-3	0,2	0,6
Polonia			2	880			
Reino Unido	40	11 921	2	1 833	810-10	55,5	19,3
República de Corea	8	6 270	1	900	36-4	38,0	46,9
Rep. Democ. Alemana	5	1 694	6	3 432	72-5	10,9*	9,9
Rumania			5	3 300			
Sudáfrica	2	1 842			8-3	10,5	7,3
Suecia	12	9 693			135-2	66,3	46,9
Suiza	5	2 952			68-10	21,5	37,4
Taiwán, China	6	4 924			44-1	29,3*	41,0*
URSS	56	33 833	26	21 230	687-2	215,7	12,6
Yugoslavia	1	632			7-3	3,9	5,2
Total mundial	429	310 812	105	84 871	5040-9	1794,4	

* Estimaciones. Fuente: SIRP del OIEA.

escala mundial. Desde fines de 1988, 26 países cuentan ya con centrales nucleares para la generación de electricidad. En 1988 la capacidad mundial total de generación de electricidad de las centrales nucleares creció en alrededor de 12 gigavatios eléctricos (GWe) y actualmente sobrepasa los 310 GWe.

Los países que pusieron en servicio nuevos reactores nucleares en 1988 fueron Francia (2), Japón (2), República Federal de Alemania (2), República de Corea (1), España (1), Reino Unido (3), Estados Unidos (2) y URSS (1). En 11 de los 26 países, más de un tercio de la electricidad total producida fue de origen nuclear. En total, con la generación de poco menos de 1800 TWh, casi el 17%, o sea, una sexta parte de la electricidad generada en el mundo en 1988, fue producido por los 429 reactores nucleares. En términos comparativos, esto equivale casi a la electricidad total generada en el mundo en 1957 a partir de todas las fuentes.

Durante los últimos 15 años el crecimiento de la utilización de energía nucleoelectrica ha sido extraordinario. Mientras la tasa de crecimiento en el consumo de electricidad de los países industrializados ha sido del 3% anual durante este período, la fracción de electricidad producida con energía nucleoelectrica ha registrado una tasa de crecimiento del 15%. En los países en desarrollo, donde el consumo de electricidad ha estado aumentando a una

tasa incluso más acelerada del 6,9% anual durante este período, la fracción producida por la energía nucleoelectrica ha registrado tasas de crecimiento de un 28% anual. Sin duda son de interés todos los países del mundo que corresponden a esta segunda categoría, en que la electrificación y todos los beneficios asociados a ella se reconocen cada vez más, lo que hace que existan tasas de crecimiento del consumo de electricidad que sobrepasan las tasas de crecimiento del consumo de energía en su conjunto, y en que la energía nuclear aún no se ha aplicado.

Proyecciones para el futuro. Proyectar el crecimiento futuro de la energía nucleoelectrica se ha convertido en una tarea sumamente difícil. El pasado no es augurio del futuro y sin duda, no lo es del futuro inmediato. Por razones que ya han sido expuestas, no sólo las tasas de crecimiento del consumo de electricidad en los países industrializados han sido más bajas durante los últimos diez años o más, lo que ha ocasionado la cancelación o el retraso de adiciones de capacidad planificadas con anterioridad, sino que las profundas preocupaciones que ha suscitado la energía nucleoelectrica en general han afectado aún más seriamente las tasas de crecimiento de energía nucleoelectrica correspondientes. En el plano mundial, el crecimiento real ha sido también constantemente más bajo que los pronósticos reiterados. (Véase la

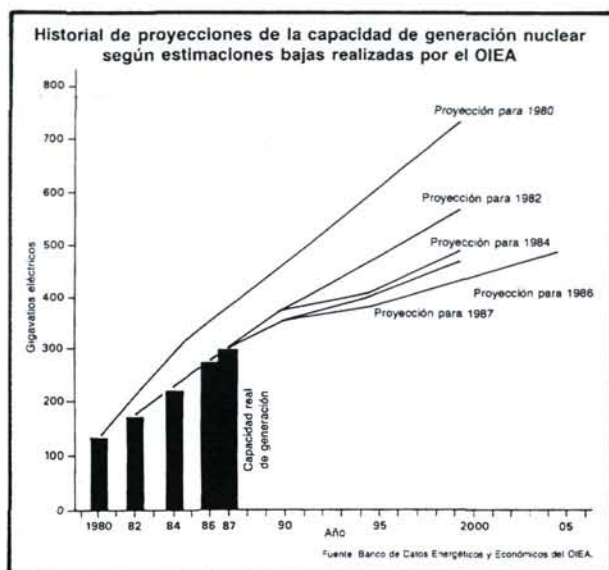


figura adjunta.) La reducción sostenida en los pronósticos de la capacidad nuclear para el año 2000 es bastante evidente, aunque se ha reducido la discrepancia en pronósticos recientes. Ello ha dado por resultado una reducción de alrededor de 300 GWe entre los pronósticos hechos en 1980 y 1987 respecto de las adiciones de capacidad nuclear para el año 2000. Como la energía nucleoelectrica aún requiere un largo período para su aplicación, que incluye la planificación, la concesión de licencias, la construcción y la puesta en marcha, las adiciones de capacidad de generación de energía nucleoelectrica a corto plazo (hasta aproximadamente el final del siglo) estarán determinadas en gran medida por decisiones anteriores, aunque todavía podrían incidir retrasos en la construcción o la concesión de licencias o cambios de política. Por el contrario, después del año 2000 la situación es menos previsible.

Sobre la base de estimaciones bajas realizadas por el OIEA en 1987, se ha calculado hasta el año 2005 el crecimiento proyectado de la capacidad de generación de energía nuclear instalada y el porcentaje de contribución de la energía nuclear a la capacidad total instalada de generación de energía eléctrica en los países industrializados y en los países en desarrollo (Véase la figura adjunta.) El incremento total de la capacidad de generación de energía nuclear de 298 GWe en 1987 a 503 GWe en el año 2005 corresponde a una tasa de crecimiento medio anual del 3% y a un aumento de 205 GWe durante este período.

De este aumento, se pronostica que la capacidad de generación de energía nuclear en los países industrializados aumente en 153 GWe, lo que equivale a una tasa de crecimiento medio anual de alrededor del 2,5% o aproximadamente a igual tasa de crecimiento pronosticada para el consumo de electricidad. En otras palabras, las preocupaciones relacionadas con la energía nuclear, a las que sin duda se han unido las proyecciones demasiado optimistas respecto del incremento del consumo de electricidad durante el inicio de los años setenta, han hecho que la participación proyectada de la energía nuclear en el crecimiento futuro de la electricidad sea casi igual al crecimiento de la capacidad global de generación de electricidad. De hecho, a partir de 1995, se pronostica que la energía nuclear se nivele en el 15% de la capacidad de generación de los países industrializados y se

mantenga a este nivel durante el resto del período que abarca el pronóstico. No obstante, debido a la mayor utilización de la capacidad de carga básica de las centrales, se espera que éstas produzcan alrededor del 23% del consumo total de electricidad entre los años 1995 y 2005.

Durante este mismo período se espera que la capacidad de generación de energía nucleoelectrica de los países en desarrollo alcance los 72 GWe hacia el año 2005, lo que equivaldría a 51 GWe de adiciones de capacidad nuclear y a una tasa de crecimiento medio anual de 7,1%. A diferencia de los países industrializados, se espera que la energía nuclear en los países en desarrollo siga logrando una creciente participación en la ampliación de la capacidad de generación de electricidad y que ascienda al 5,3% hacia el año 2005. Así, como ya se ha indicado, se espera que el 25% de toda la nueva capacidad de generación de energía nuclear que se ponga en explotación comercial en el mundo para el año 2005 se halle en los países en desarrollo.

Se pronostica que para el año 2005 la participación de la energía nuclear a nivel mundial sea de un 12% de la capacidad total de generación de electricidad, lo que está muy por debajo de las expectativas de hace diez años, pero que se basa de forma razonable en la situación y las tendencias actuales. Algo inquietante es el hecho de que para que se cumplan las proyecciones actuales de la demanda total de electricidad, la generación de electricidad con combustibles fósiles, principalmente el carbón, tendrá que aumentar en un factor de aproximadamente 1,8 para el año 2005, lo cual no es una tendencia conveniente desde el punto de vista de los efectos sobre el medio ambiente. Por lo tanto, no es probable que se cumpla el llamamiento de la Conferencia de Toronto de 1988 a reducir las emanaciones de CO₂ un 20% por debajo del nivel de las emanaciones actuales.

Enseñanzas extraídas de la experiencia anterior.

Para que la energía nucleoelectrica vuelva a estar en condiciones de suministrar un porcentaje cada vez mayor de la nueva capacidad de generación en los países industrializados en su conjunto, mantenga y, en el mejor de los casos, aumente la tasa de crecimiento de los países en desarrollo y, en efecto, abra las puertas para la introducción de la energía nuclear en varios otros países, deberá prestarse suma atención a las enseñanzas extraídas de la experiencia anterior.

En este sentido revistieron especial importancia los accidentes ocurridos en las centrales nucleares de Three Mile Island y Chernobil. Ambos hicieron que todos los países con centrales nucleares en explotación reexaminaran cuidadosamente las características básicas de seguridad de sus propias centrales. El primero de estos accidentes, a pesar de que fue relativamente insignificante en cuanto a las consecuencias para el público, coadyuvó a la introducción de varias mejoras para elevar aún más la seguridad y la fiabilidad tecnológicas. Este accidente también reveló que la instrumentación disponible podría originar una mala interpretación de la situación del sistema del reactor. La capacitación de los operadores tampoco era suficiente para permitirles interpretar los sucesos inusitados a medida que se desarrollaban. En consecuencia, se mejoraron los simuladores y se hizo más rigurosa la capacitación de los operadores, incluso sobre sucesos inusitados simulados. Además, la

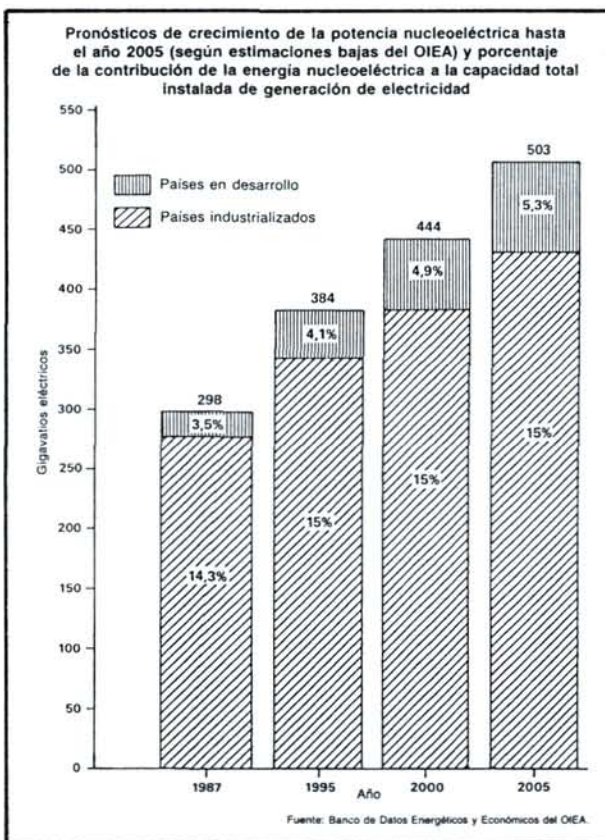
instrumentación en sí mejoró y los operadores recibieron una información mejor formulada. Este aspecto, a menudo denominado interfaz hombre-máquina, está aún en desarrollo. El accidente de Chernobil sin dudas repercutió profundamente en el público y tuvo una significación internacional mucho mayor. Este accidente ha llevado a la Unión Soviética a emprender una reevaluación muy minuciosa de su programa nuclear y del tipo de centrales que construirá en el futuro.

Independientemente de las diferentes consecuencias que acarrearán para el público, ambos accidentes ciertamente ocasionaron enormes pérdidas económicas y de inversión, así como grandes gastos por concepto de limpieza, experiencia ésta que claramente exige que en centrales nucleares futuras se preste una mayor atención a la protección contra los riesgos económicos y de inversión.

Otros factores decisivos que deben ser objeto de examen en un futuro son la fiabilidad de las centrales nucleares y su disponibilidad, aspecto estrechamente asociado al primero y que indica el porcentaje de tiempo al año en que una central es capaz de suministrar energía. En realidad, durante el último decenio se han alcanzado importantes mejoras en lo concerniente a la disponibilidad. En 1977, el factor de disponibilidad media de las 137 unidades de reactores nucleares de potencia comunicado al Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA fue sólo del 64,7%; en 1982, el número de unidades de reactores nucleares había aumentado a 200, pero el factor de disponibilidad media se mantuvo en aproximadamente el 65%, cifra que fue motivo de preocupación. Ya en 1987 esta cifra se había elevado al 71,4% para 346 unidades de reactores nucleares de potencia. Más significativo aún es el hecho de que el 42% de estas unidades de reactores nucleares funcionaron con una disponibilidad energética del 80% o más en 1987. Sin duda es preciso que se prosigan los esfuerzos por mantener esta tendencia de perfeccionamiento.

En consecuencia, mediante estudios de seguridad probabilista —en que las probabilidades de fallos de los componentes y sistemas se utilizan para calcular la probabilidad general de una secuencia de fallos— se han identificado los eslabones débiles de las cadenas de seguridad y adoptado medidas para mejorar la seguridad global. Se han analizado también los fallos humanos mediante técnicas análogas. Como resultado, se han reducido en gran medida los problemas inherentes a los sistemas de seguridad de las centrales.

Otro factor que ha adquirido predominio en función de la experiencia pasada como elemento esencial de orientación de los acontecimientos futuros es la cuestión del tamaño de la central. Reconociendo que las centrales nucleares son instalaciones de gran densidad de capital, la mayor parte de los nuevos diseños que han elaborado los países altamente industrializados son de tamaños cada vez mayores a fin de lograr las reducciones prometidas en el costo de inversión por potencia disponible por unidad. Tales extrapolaciones no sólo han elevado la complejidad en lo que respecta al número de componentes y a la instrumentación y el control necesarios, sino que han impuesto mayores exigencias a la capacidad de explotación y mantenimiento. La simplificación de los sistemas no sólo podría reducir los fallos humanos en las



fases de explotación y mantenimiento, mejorando así la seguridad, sino que también podría reducir los costos de inversión. Algunos diseñadores consideran que con unidades de potencia más pequeñas se puede lograr eficazmente la simplificación, una alta calidad inherente, una mayor utilización de los procesos naturales de seguridad y una economía eficiente. Cada vez se hace más obvio, tanto en función de la aplicación futura en muchos países en desarrollo como en función de la flexibilidad para cumplir las normas de crecimiento de la carga evidentemente más bajas en algunos países industrializados, que existe un mercado para centrales nucleares más pequeñas. Las investigaciones iniciadas por el OIEA en 1983 sobre las centrales de pequeña y mediana potencia (SMPR) así lo han demostrado.

Otro factor relacionado con el tamaño y que también imprime impulso al desarrollo futuro de los SMPR es la posible aplicación en el futuro de la energía nucleoelectrica para generar calor solamente, sea en forma de calefacción a baja temperatura en zonas urbanas para aplicaciones industriales y residenciales, sea para generar vapor y calor industriales a temperaturas más elevadas. Las preocupaciones acerca de la liberación de gases de efecto de invernadero en ese tipo de aplicaciones, en caso de que se continúen utilizando los combustibles fósiles, pueden acelerar la necesidad de generación de calor nuclear en un futuro no muy distante. El mercado para tales sistemas exige que éstos sean de tamaño más pequeño y que las redes de distribución estén más localizadas.

Bases para el éxito futuro. La experiencia acumulada en la esfera de la energía nucleoelectrica ha establecido las bases para su futura estructura, que deberá tener muchas facetas:

- centrales de gran tamaño para aquellos países industrializados cuya carga, crecimiento de la carga, y sistemas de distribución justifiquen tal aplicación;

- centrales de pequeño y mediano tamaño en que ocurre lo contrario, y para otras aplicaciones además de la generación de electricidad solamente;
- una mayor atención a los aspectos inherentes a la seguridad, independientemente del tamaño de la central, en que se haga mayor hincapié en períodos de gracia más prolongados respecto de las medidas de seguridad, en las características pasivas y, en la capacidad del hombre, si acaso es necesaria, para controlar y resolver la situación, especialmente en condiciones anormales; además, las centrales deberán estar diseñadas con buenos márgenes operacionales de manera que en raras ocasiones los sistemas de seguridad planteen dificultades; el aumento de la animadversión al riesgo de inversión puede considerarse un subconjunto de esta faceta;
- una mayor normalización y centrales más simples, que permitan mejorar los programas, lograr mayores ahorros, elevar la fiabilidad, simplificar el régimen de explotación, mejorar la interfaz hombre-máquina, centralizar los servicios, ampliar el intercambio internacional y elevar la comprensión general; además, deberá perfeccionarse el mecanismo de reglamentación para que dé respuestas rápidas sin perder eficacia;
- mejoras en la utilización de los recursos; eficacia en el cierre del ciclo del combustible y eficiencia en la manipulación de desechos.

Para que las bases mantengan su solidez, todo el proceso deberá continuar teniendo como característica inherente la "lucha por la excelencia" en cada central y en cada actividad, la que se ha convertido en una frase clave en relación con el esfuerzo del hombre por reactivar el régimen de crecimiento nuclear.

Tendencias de desarrollo de la energía nucleoelectrónica

Estas nuevas bases no sólo están recibiendo mayor atención de los gobiernos y entidades industriales de naciones que ya cuentan con una infraestructura nucleoelectrónica bien desarrollada, sino también de aquellas naciones que analizan seriamente la posibilidad de ampliar o comenzar a aplicar la energía nucleoelectrónica. Las tendencias de desarrollo de todos los conceptos de reactores reflejan claramente la influencia de la experiencia anterior y las bases revisadas para el futuro.

Reactores de agua ligera. La actual tecnología de reactores de agua ligera (LWR) ha demostrado ser económica, segura y fiable. La mayor parte de los países industrializados siguen produciendo grandes unidades, con potencias de salida que sobrepasan los 900 MWe, como los LWR avanzados (ALWR), para su explotación en el decenio de 1990. Estos diseños de ALWR son el resultado del continuo perfeccionamiento y mejoramiento evolutivo de los modelos actuales. Por ejemplo, el modelo N4 (1400 MWe), que actualmente se construye en Francia, se deriva directamente de la serie P4 (1300 MWe) normalizada, aunque logra una reducción del 5% del costo por kilovatio instalado en comparación con la serie P4. En la República Federal de Alemania las centrales "Convoy" son un grupo de tres reactores de agua a presión de 1300 MWe de tamaño normal. Los elementos avanzados de las centrales "Convoy" se ubican principalmente en la ingeniería y la gestión de pro-

yectos asociados con la construcción de centrales nucleares. En la URSS se ha comenzado el diseño del VVER-1800 como versión perfeccionada del VVER-1000, en que se aprecian mejoras en los aspectos económico y de seguridad. El reactor avanzado de agua a presión (APWR-1350 MWe) de Westinghouse-Mitsubishi, el PWR "Sizewell-B" (1250 MWe) británico, el "System 80 Plus" (3800 MWt) de Combustion Engineering y el reactor avanzado de agua en ebullición (ABWR-1360 MWe) de General Electric-Hitachi-Toshiba, son otros ejemplos del ALWR de gran tamaño. En todos estos sistemas avanzados se observan mejoras en el procedimiento tecnológico y operacional, mejor rendimiento y quemado del combustible, mejor interfaz hombre-máquina mediante el uso de computadoras y mejor representación visual de la información, mayor normalización de la central, mejor calificación de los operadores y capacitación de éstos con simuladores. Como resultado, se ha mejorado gradualmente el factor de disponibilidad del reactor y se ha reducido el número de problemas de que adolecen los sistemas de seguridad.

El programa de los Estados Unidos, que lleva a cabo el Electric Power Research Institute conjuntamente con el Departamento de Energía, es un ejemplo de enfoque diferente del desarrollo evolutivo. Se ha recopilado un conjunto global de requisitos de los usuarios y está previsto que en un período de tres años se realice el diseño conceptual de los ALWR que cumpla estos requisitos, para lo cual se contará con la participación de la industria. Se están tomando en cuenta tanto los reactores grandes como los más pequeños (con una potencia de salida de 600 MWe o menos) y en las unidades más pequeñas se prestará mayor atención al uso de los dispositivos de seguridad pasiva. Un aspecto esencial de este programa es la certificación del diseño por parte de las autoridades encargadas de la concesión de licencias, y se prevé que estas unidades podrían comercializarse en el decenio de 1990 sin necesidad de que medie una demostración. El reactor de agua a presión AP-600 (reactor pasivo avanzado de 600 MWe), y el SBWR (reactor simplificado de agua en ebullición) y el reactor de agua a presión SIR (reactor de seguridad integrada) son ALWR pequeños en que se ha hecho hincapié en una mayor seguridad pasiva. El SIR ha sido creado conjuntamente por Combustion Engineering y Stone and Webster de los Estados Unidos junto con la Rolls-Royce y el Organismo de Energía Atómica del Reino Unido.

Los diseñadores del reactor PIUS (ABB-Atom) y del ISER (Universidad de Tokio) están adoptando un enfoque más radical. Estos reactores están basados en el principio de que la capacidad para parar el reactor y proporcionar una refrigeración constante al núcleo a fin de eliminar el calor de desintegración después de los accidentes debe ser totalmente pasiva. A estos diseños se añaden varias peculiaridades singulares de diseño de centrales, cuyo funcionamiento es totalmente pasivo —y por ende, no requiere la intervención del operador— y cuyo comportamiento está basado en principios físicos irrefutables. Los diseños, que abarcan tanto los conceptos de reactores de agua en ebullición como los de agua a presión y principalmente de pequeño tamaño, en muchos casos están en una etapa primaria de diseño del concepto y probablemente se necesite una central de demostración para comprobar el principio. Por esta ra-

zón parecería que estos conceptos distan más de ser comercializados.

Debido a las demoras evidentes en la instalación a gran escala de los reactores reproductores, sobre todo por consideraciones relacionadas con los costos, la mejor utilización de los recursos de uranio ha pasado a ser otro elemento en el desarrollo evolutivo de los LWR. La introducción de cambios relativamente limitados en los actuales reactores de agua podría ofrecer opciones atractivas para tales estrategias de mejor utilización de los recursos. Estos cambios podrían incluir desde el reciclado del plutonio hasta nuevos diseños del núcleo dirigidos en especial a mejorar notablemente la utilización del combustible. Algunos de estos enfoques entrañarían pocos riesgos económicos y podrían ser incorporados de manera fácil y rápida. Se espera que los estudios de validación y los trabajos de perfeccionamiento que se realizan en varios países, entre ellos, los Estados Unidos, el Japón, la República Federal de Alemania y, en especial, Francia, confirmen en breve la viabilidad técnica y económica y la seguridad. Si resultan satisfactorias, muchas de estas modificaciones podrían aplicarse a los reactores existentes en los próximos tres a cinco años.

Reactores de agua pesada. Se han creado dos tipos de reactores comerciales refrigerados con agua pesada a presión (HWR). La aplicación comercial tanto de la variante de tubos de presión como la de vasija de presión ha quedado plenamente comprobada en varios países. Los tamaños disponibles tienen una potencia de salida que fluctúa entre unos pocos cientos de MWe y 900 MWe. Los factores de capacidad durante la vida útil de la mayoría de ellos han estado entre los más elevados de todos los tipos de reactores comerciales. También su comportamiento desde el punto de vista de la seguridad ha demostrado ser muy bueno. Se ha cumplido el compromiso de reducir los costos de la carga del combustible gracias a la economía de neutrones inherente a la moderación por agua pesada. Esta economía de neutrones inherente ofrece posibilidades para una amplia gama de ciclos del combustible, incluido el uranio poco enriquecido, permite utilizar el uranio reelaborado procedente de los LWR (lo que ofrece un sinergismo entre los LWR y los HWR), reciclar el plutonio y contar con ciclos de alta transformación del torio. La mayoría de estas posibilidades están siendo investigadas, especialmente en el Canadá, como parte de un continuo programa de desarrollo.

Los programas permanentes de desarrollo del diseño de los HWR están destinados fundamentalmente a reducir los costos de las centrales y a perfeccionar evolutivamente su comportamiento y seguridad. Entre estos diseños se incluyen los reactores de 500 MWe de la India, varios diseños del Canadá, incluido el CANDU-3 de 480 MWe y el CANDU-6 MK2 de 800 MWe, así como el Argos de 380 MWe que están elaborando en conjunto una sociedad de estudios técnicos de la Argentina y la Siemens de la República Federal de Alemania.

Reactores refrigerados por gas. Al parecer, el programa de reactores avanzados refrigerados por gas (AGR), iniciado por el Reino Unido, ha llegado a su fin con la terminación de las Centrales Heysham-2 y Torness en ese país. Los futuros trabajos de desarrollo de este sistema de refrigeración con dióxido de carbono estarán concentrados en la mejora del comportamiento de

las centrales y en estudios para ampliar la vida útil de las centrales existentes.

Los Estados Unidos, la República Federal de Alemania, la URSS y el Japón prosiguen el desarrollo del reactor de alta temperatura refrigerado por gas helio (HTGR). Los esfuerzos se centran principalmente en pequeños diseños modulares con una capacidad de generación independiente de 80 MWe a aproximadamente 150 MWe, mientras que por el momento sólo se realizan esfuerzos limitados en diseños de mayor tamaño basados en el reactor de Fort St. Vrain (de 330 MWe en los Estados Unidos) y el THTR (de 300 MWe en la República Federal de Alemania). Estos esfuerzos actuales se deben en su totalidad al examen crítico de los requisitos de la nueva estructura diseñada para las futuras centrales nucleares. Se ha otorgado prioridad a la naturaleza modular de los diseños y al máximo uso de la construcción en la fábrica, en contraposición con la construcción sobre el terreno para lograr un mejor control de calidad y ahorro de tiempo y costos. La potencia de salida de los distintos módulos y configuraciones del núcleo del reactor se han determinado deliberadamente con miras a satisfacer los criterios de seguridad y de protección contra los riesgos de inversión (que son más rigurosos que los aplicados anteriormente respecto de cualquier sistema de reactor), mediante sistemas completamente pasivos estrechamente asociados al núcleo del reactor. Se ha previsto lograr ahorros considerables en materia de costos mediante la separación de estos pocos sistemas nucleares—construidos conforme a la reglamentación nuclear—de la mayor parte de la central, que podría construirse con arreglo a normas de construcción más convencionales.

Los rasgos principales del HTGR que permiten estas características son el refrigerante de helio inocuo, la gran masa de moderador de grafito (y, por ende, la baja densidad de potencia) estrechamente asociada al combustible, el coeficiente de potencia siempre negativo y, en especial, el propio combustible que se presenta en forma de pequeñas partículas cubiertas individualmente por múltiples capas de material cerámico. Unido al moderador de grafito, este combustible es capaz de soportar temperaturas muy elevadas sin perder su integridad. Estas centrales son capaces de resistir un accidente con pérdida total de refrigerante, rasgo singular que no presenta ningún otro sistema de reactor.

Después de 30 años de experiencia en la esfera operacional y del diseño, las características básicas y el comportamiento técnico de los HTGR son ya bien conocidos. No obstante, se reconoce que quizá sea necesario demostrar los rasgos y características singulares de los HTGR modulares para que se certifique su diseño y puedan comercializarse. De ahí que en los programas que se llevan a cabo en los Estados Unidos, la República Federal de Alemania y la URSS se esté obrando en consecuencia. Dado el tamaño relativamente pequeño de cada módulo, es posible prever que la demostración se realice con un sólo módulo y que más tarde se extienda a una central multimodular en el mismo emplazamiento para fines industriales. De hecho, una de las ventajas que se adjudican al concepto modular es la capacidad de ampliación progresiva en un mismo emplazamiento, a medida que se añaden módulos para satisfacer las necesidades de aumento de la carga. Este rasgo, conjun-

tamente con la naturaleza inocua del concepto, quizás podría convertir al HTGR modular en un buen candidato para la exportación a países con poca demanda de electricidad y una infraestructura menos desarrollada para la aplicación de la energía nucleoelectrónica.

A pesar de que se reconocen las posibilidades para elevar la calidad de la producción de vapor y la eficiencia en la generación de electricidad, el programa del HTGR del Japón está encaminado principalmente a demostrar la capacidad de refrigerante del helio para resistir temperaturas de salida del núcleo aún más elevadas (de hasta 1000°C) con miras a su empleo en numerosas aplicaciones industriales del calor. En estos momentos se construye en el Japón un pequeño reactor de prueba, el HTTR de 30 MWe, con vistas a realizar ensayos vinculados a este objetivo.

Reactores de metal líquido. El emplazamiento de reactores rápidos de metal líquido (LMFR) como reactores reproductores, así como para generar electricidad, no ha logrado el impulso esperado debido a la disponibilidad de recursos de uranio suficientes y de bajo costo para satisfacer las demandas a corto y mediano plazo. Con todo, los países industrializados son conscientes de que los reactores reproductores serán necesarios durante los primeros decenios del próximo siglo, sobre todo si vuelve a cobrar auge el empleo de la energía nucleoelectrónica.

Mientras tanto, se sigue acumulando experiencia sobre la base de más de 200 años-reactor de experiencia operacional de las unidades energéticas LMFR experimentales y de mediano tamaño. También prosigue el desarrollo del diseño de versiones avanzadas, para lo que se ha tomado debida cuenta de la estructura revisada para la próxima generación de centrales nucleares. De igual forma continúan los trabajos en el desarrollo del ciclo del combustible, sobre todo en lo que respecta a la extensión del grado de quemado del combustible y a la demostración del cierre del ciclo del combustible. La mayor parte de los adelantos alcanzados en el ciclo del combustible están relacionados con el óxido mixto, aunque los últimos acontecimientos registrados en los Estados Unidos en cuanto al uso de combustible metálico ternario (U-Pu-Zr) y el piroprocesamiento asociado del combustible gastado, son muy prometedores. Un rasgo notable del piroprocesamiento es que la mayoría de los elementos actínidos de período largo que acompañan al plutonio durante todo el proceso, son posteriormente reciclados y extraídos así de la corriente de desechos.

Los trabajos de elaboración del diseño en Europa, el Japón, la URSS y la India siguen el criterio tradicional de tomar en cuenta diseños de centrales de gran tamaño alimentadas con óxidos mixtos. En Europa y la URSS se están creando unidades de entre 1500 y 1600 MWe, en las que el diseño de los componentes, el diseño de la central y el ciclo del combustible siguen la pauta evolutiva basada en la explotación satisfactoria del Phénix y el Superphénix en Francia, el PFR en el Reino Unido y el BN-350 y el BN-600 en la URSS. En estos momentos se realizan ingentes esfuerzos por hacer un mejor uso del concepto de la seguridad pasiva en estos diseños. Los esfuerzos que se llevan a cabo en el Japón y la India se centran en unidades más pequeñas como próximo paso en la evolución del diseño. Como se espera que el reactor prototipo Monju de 280 MWe alcance la criticidad en

1992, se prevé que el próximo reactor que instale el Japón oscile entre los 800 y 1000 MWe. Sobre la base de su reactor reproductor rápido de prueba (FBTR), la India avanza en el diseño subsiguiente de un prototipo de piscina (PFBR) de 500 MWe.

Con la desaparición del reactor reproductor Clinch River de los Estados Unidos a principios de los años ochenta, el programa de reactores de metal líquido se basó inicialmente en diversos conceptos de diseño avanzado. En estos momentos el objetivo fundamental del programa es el concepto de tipo modular (PRISM) desarrollado por la General Electric Company. Cada bloque de potencia del sistema propuesto consta de 3 módulos de reactor de 471 MWt conectados a un solo generador de turbina de 465 MWe. Entre las numerosas características innovadoras de la central se incluye el empleo del ciclo del combustible metálico ternario, la parada inherente al reactor mediante las respuestas térmica y de reactividad, la extracción pasiva del calor de desintegración y todas las demás características de construcción y de índole operacional que requiere este tipo de conceptos modulares pequeños. El programa avanza en el diseño conceptual, etapa previa a la concesión de la licencia sobre este concepto, con el fin de obtener la certificación del diseño luego de realizar amplias comprobaciones de un módulo prototipo en gran escala.

Conclusiones

La tendencia hacia el aumento del consumo de energía eléctrica en el mundo lleva a varias conclusiones:

- La electricidad se prevé claramente como la opción energética más adecuada y más adaptable para el futuro. Para ello existen diversas razones, como son la limpieza, la facilidad de transporte y el uso final, la eficiencia y la versatilidad general de la electricidad. Se espera que continúen las tasas de crecimiento de la electricidad, que son más altas que las tasas de crecimiento demográfico de población y de consumo total de energía.
- La demanda de electricidad originará demandas cada vez mayores de los recursos básicos que se utilizan para generar electricidad. Se prevé el rápido agotamiento de los recursos naturales a nivel mundial si esos recursos continúan siendo los medios principales para generar electricidad y las consecuencias ambientales de dicha utilización serán definitivamente significativas. A la larga, se debería desarrollar y emplear otros recursos para la generación de electricidad.
- La energía nuclear, pese a la animada controversia que ha provocado su uso tanto en el pasado como en el presente, puede generar electricidad de una forma segura, fiable y económica. En realidad, al analizarse en una perspectiva más amplia, la creciente necesidad mundial de electricidad y el desarrollo de la energía nuclear, que no libera dióxido de carbono en el medio ambiente, parecen haber surgido simultáneamente como una cuestión de coincidencia y de necesidad absoluta.
- El desarrollo constante de la energía nucleoelectrónica en forma de pequeños cambios evolutivos hacia los tipos que actualmente se despliegan y de mayores adelantos tecnológicos como los que se consideran en varios diseños de reactores avanzados, abarca varias de las cuestiones vinculadas a esta esfera. Estos programas de desarrollo deberán proseguirse vigorosamente.