

La energía nucleoelectrica después de Chernobil: Evolución de la perspectiva internacional

El desarrollo de la energía nucleoelectrica ha disminuido en los 10 últimos años, pero se proyecta un crecimiento continuo hasta bien entrado el próximo siglo

por
Poong Eil Juhn
y **Jürgen**
Kupitz

Las estadísticas registran que la energía nucleoelectrica se ha convertido en una importante fuente de energía en muchos países desde su introducción hace cuatro decenios. En los años sesenta, la industria estaba convencida de que la energía nucleoelectrica representaba la solución para atender a las necesidades de suministro energético barato y fiable, y los programas se ejecutaban en todo el mundo con entusiasmo. Como resultado de ello, la construcción de centrales nucleares creció rápidamente durante ese decenio. Según datos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (SIPR) del OIEA, en 1980 la producción de energía nucleoelectrica había aumentado a 692,1 teravatio-horas (TWh) para aportar el 8,4% de la generación total de electricidad. (Véanse las cifras de la página siguiente.) Ello representó casi nueve veces más que lo producido en 1970 y un crecimiento anual promedio del 24% en el decenio.

Desde los años ochenta el ritmo de expansión se ha reducido notablemente, aun cuando cada año se siguen sumando nuevas e importantes capacidades de producción de electricidad de origen nuclear. En el período 1980-1985, la generación de electricidad de origen nuclear aumentó a 1402 TWh, lo que corresponde a un crecimiento anual promedio del 15,2% en cuanto a generación; en el quinquenio siguiente, durante 1985-1990, aumentó a 1913 TWh, para un crecimiento anual del 6,4%. En el período comprendido entre 1990 y 1994, aumentó a 2130 TWh, lo que representa un crecimiento de alrededor del 2,8% anual. Los cinco mayores productores en 1994 fueron los Estados Unidos de América (639,4 TWh), Francia (341,8 TWh), el Japón (258,3 TWh), Alemania (143,0 TWh) y el Canadá (101,7 TWh).

En el mundo, la opción nuclear representa hoy día alrededor del 17% de la electricidad total que se produce. En 14 países (y en Taiwán, China), la cuarta

parte o más de la electricidad es generada por centrales nucleares. La energía nucleoelectrica representa un 40% o más en ocho países: Bélgica, Bulgaria, Eslovaquia, Francia, Hungría, Lituania, Suecia y Suiza. (Véase la sección titulada *Datos estadísticos internacionales en la página 53.*)

A finales de 1995 funcionaban en el mundo 437 unidades con una capacidad de generación de más de 343 gigavatio- eléctricos (GWe), y se construían 39 unidades con una capacidad de generación de más de 32 GWe. La experiencia operacional total acumulada de las centrales en funcionamiento asciende a más de 6637 años-reactor, o sea, un período de funcionamiento promedio por central de unos 15 años. También se ha extraído gran experiencia operacional de centrales que ahora han sido paradas, y la factorización de esas centrales arroja un total de más de 7700 años-reactor. En otras palabras, la energía nucleoelectrica ya ocupa una posición sólida en el sector de la generación de electricidad como tecnología de eficacia comprobada.

Repercusiones del accidente de Chernobil

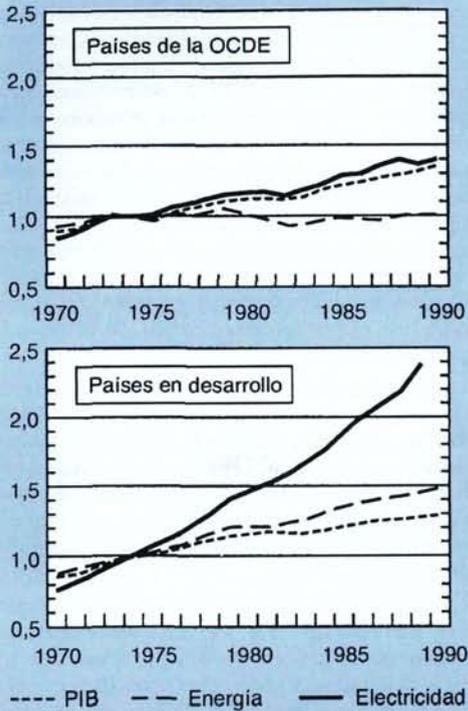
Las recientes tendencias del desarrollo podrían dar la impresión de que la reducción del ritmo de crecimiento de la energía nucleoelectrica después del período 1985-1990 se debe principalmente al accidente de Chernobil, ocurrido en abril de 1986. De hecho, también intervinieron otros factores y, en general, las repercusiones de Chernobil no fueron iguales en todo el mundo.

Uno de los factores ha sido el ritmo de crecimiento de la electricidad, que en muchos países descendió durante los últimos diez años e influyó en las decisiones de aumentar la capacidad en todo ese sector. Como para construir una central nuclear se necesitan de 5 a 8 años, con un tiempo de preparación (después del contrato) de 1 a 2 años, sería difícil percibir cualquier indicio visible del impacto directo de Chernobil durante el pasado decenio.

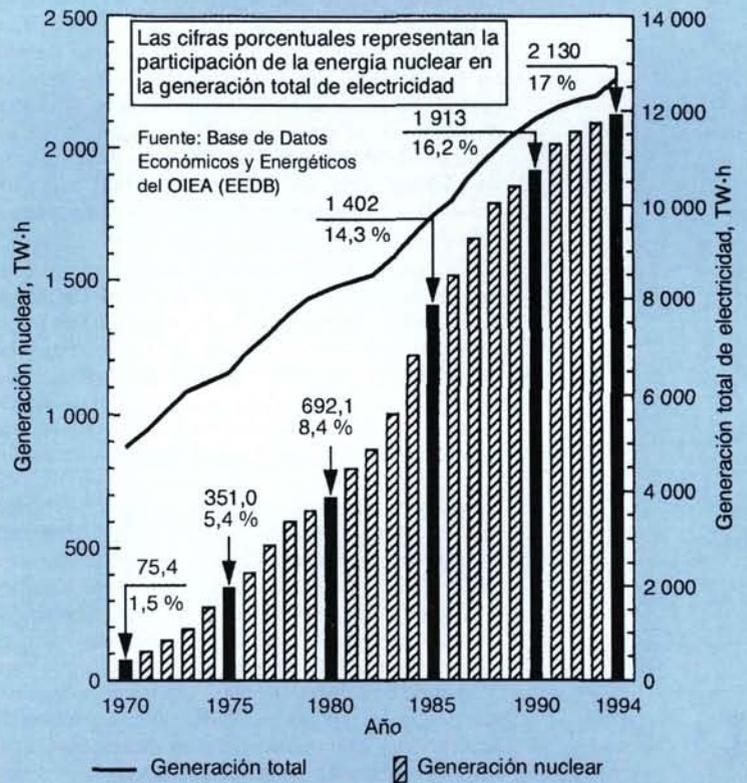
El Sr. Juhn es Director de la División de Energía Nucleoelectrica del OIEA y el Sr. Kupitz es Jefe de la Sección de Desarrollo de la Energía Nucleoelectrica de la División.

Tendencias del crecimiento del producto interno bruto (PIB); Energía y Electricidad

(valores per capita, normalizados a 1 en 1974)



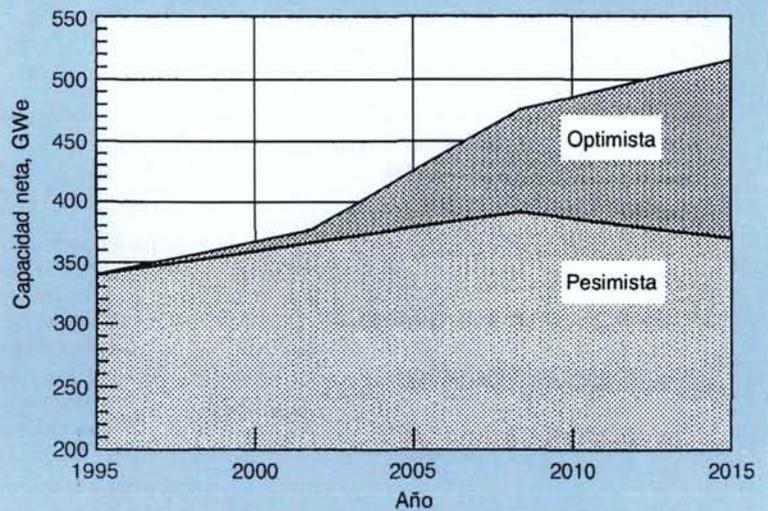
Crecimiento de la generación de electricidad de origen nuclear desde 1970



Factores de las emisiones de CO₂ procedentes de la cadena energética completa de diferentes fuentes de energía



Perspectivas de la energía nucleoelectrica en el mundo hasta el año 2015



El crecimiento de la energía nucleoelectrica se ha reducido notablemente en los dos últimos decenios, aunque el desarrollo sostenido continúa. Las preocupaciones ambientales están concitando un renovado interés en la electricidad generada a partir de la energía nuclear, opción que reduce las emisiones de CO₂.

Con todo, el accidente sí tuvo consecuencias inmediatas en algunos países. En los países donde se explotan reactores del tipo de Chernobil, se verificó cuidadosamente el funcionamiento de las centrales y se impusieron una serie de restricciones. La oposición del público también provocó que se pararan durante un tiempo otros tipos de centrales fuera de estos países. En Italia, se cerró indefinidamente la central de Caorso y se interrumpió la construcción de las centrales de Montalto di Castro después de un referendo celebrado a raíz del accidente, y en Finlandia y los Países Bajos se aplazaron los proyectos de construcción de nuevas centrales nucleoelectricas.

En general, el accidente de Chernobil es una de las razones de que en Europa se haya más o menos detenido la expansión nuclear. Los políticos no se atreven a promover la energía nucleoelectrica como fuente de energía segura y no contaminante, y las compañías nucleoelectricas temen los riesgos financieros relacionados con las consecuencias económicas de un accidente nuclear de envergadura. Además, las economías de los países europeos han venido creciendo a un ritmo muy lento, si es que han crecido siquiera algo, y la tasa de crecimiento de la demanda general de energía ha sido muy pequeña. Por otra parte, estudios realizados recientemente han demostrado que es probable que la situación cambie. El consumo de electricidad sigue aumentando con el crecimiento económico, aun cuando el consumo total de energía está disminuyendo. Dentro de unos años, muchos países tendrán que aumentar su capacidad de generación, y es probable que parte de esta capacidad adicional la brinden las centrales nucleares.

En regiones de Asia la situación es diferente; el ritmo de crecimiento de la demanda de energía es muy elevado y la energía nuclear se considera una opción atractiva. Muchos países de estas regiones tienen programas ambiciosos de expansión de la energía nucleoelectrica para los próximos decenios, y los vendedores de todo el mundo están previendo la reactivación del mercado nuclear.

Diseños avanzados de centrales nucleares

En una serie de países se está haciendo mucho hincapié en el desarrollo de diseños avanzados de centrales nucleares. Sobre la base de la experiencia y de las enseñanzas extraídas de las centrales en explotación, se han desarrollado, o se están desarrollando, estas nuevas generaciones de centrales nucleares; por lo tanto, se prevé que los nuevos diseños avanzados sean aún más seguros, económicos y fiables que sus predecesores.

Los diseños avanzados generalmente incorporan mejoras de los conceptos relacionados con la seguridad, incluidas, entre otras, características que permitirán a los explotadores disponer de más tiempo para tomar medidas de seguridad, y que proporcionarán una protección aún mayor contra cualquier posible liberación de radiactividad al medio ambiente. También se presta gran atención a la simplificación de las actividades de explotación, inspección, man-

tenimiento y reparación de las nuevas centrales, a fin de aumentar su fiabilidad y economía general.

Los diseños avanzados comprenden dos subcategorías: los diseños evolutivos y los de desarrollo. Los primeros abarcan a descendientes directos de los predecesores (diseños de centrales en explotación) que incorporan mejoras y modificaciones efectuadas en base al aprovechamiento de las experiencias, así como nuevos adelantos tecnológicos. También tienen en cuenta la posible introducción de algunas nuevas características, como por ejemplo, la incorporación de funciones de seguridad pasiva. Los diseños evolutivos se caracterizan porque requieren, a lo sumo, ensayos técnicos y confirmatorios previos al despliegue comercial. Los diseños de desarrollo son aquellos que se apartan más significativamente de los diseños existentes y, por ende, requieren mucho más ensayo y verificación, incluida probablemente también la construcción de una planta de demostración y/o planta prototipo antes del despliegue comercial en gran escala.

Los diseños avanzados que se están desarrollando comprenden tres tipos básicos: reactores refrigerados por agua, que utilizan el agua como refrigerante y moderador; los reactores rápidos, que emplean como refrigerante un metal en estado líquido, por ejemplo, el sodio; y reactores refrigerados por gas, que emplean como refrigerante un gas, por ejemplo, el helio y el grafito como moderador.

La mayoría de los reactores nucleares en explotación -alrededor del 75%- son reactores refrigerados por agua, como también lo son la mayoría de los diseños avanzados. Existen dos tipos básicos: los reactores de agua ligera (LWR) que utilizan agua normal como moderador, y los reactores de agua pesada (HWR). A su vez, los LWR se subdividen en reactores de agua en ebullición (BWR) y reactores de agua a presión (PWR).

Ejemplos de LWR avanzados evolutivos de gran tamaño son: el ABWR de General Electric, Estados Unidos, el APWR de Westinghouse, Estados Unidos, y Mitsubishi, Japón; el BWR-90 de ABB Atom, Suecia; el EPR de Nuclear Power International (NPI), empresa conjunta de Framatome, Francia, y Siemens, Alemania; el SWR (o BWR) 1000 de Siemens; el System 80+ de ABB Combustion Engineering, Estados Unidos; el WWR-1000 (V-392) de Atomenergoprojekt y Gidropress, Rusia; y el KNGR, de KEPCO y KAERI, República de Corea. Entre los ALWR de mediano tamaño figuran cinco diseños típicos: el AP-600 de Westinghouse, Estados Unidos; el AC-600 de China National Nuclear Corporation, China; el MS-600 de Mitsubishi, Japón; el SBWR de General Electric, Estados Unidos; y el WWR-640 (V-407) de Atomenergoprojekt y Gidropress, Rusia. Ya se dispone, o se dispondrá dentro de varios años, de muchos de los diseños de grande y mediano tamaño para su despliegue comercial.

Es más incierta la situación de los diseños de desarrollo como el ISIS de Ansaldo, Italia; el PIUS de ABB Atom, Suecia; el SPWR de JAERI e IHI, Japón; y el VPBER-600 de OKBM, Rusia; ello se debe a la necesidad de verificar los experimentos y a las cargas financieras conexas.

Ejemplos típicos de HWR avanzados en desarrollo son los diseños avanzados canadienses -Candu-3 (de

unos 450 MWe), Candu-6 (actualmente de unos 680 MWe), y los diseños Candu (de 900-1100 MWe), de AECL, Canadá- y el PHWR de diseño mejorado de la India (de unos 500 MWe).

Desde hace muchos años en una serie de países se han venido desarrollando los reactores rápidos refrigerados por metal líquido (LMFR) o reactores reproductores. El diseño, la construcción y la explotación de varias centrales, como la BN-600, de Rusia, la Superphenix, de 1200 MWe, de Francia, y la Monju, de 280 MWe, del Japón, han permitido adquirir una amplia experiencia de más de 200 años-reactor para introducir ulteriores mejoras. Los reactores rápidos utilizan neutrones "rápidos" en apoyo del proceso de fisión y en realidad producen combustible además de consumirlo; la reproducción del plutonio permite a los reactores rápidos extraer del uranio sesenta veces más energía que los reactores térmicos. Su capacidad para producir material fisionable podría ser indispensable a más largo plazo si la expansión de la energía nucleoelectrica aumenta sustancialmente en los próximos decenios. Los reactores rápidos podrían contribuir igualmente al quemado del plutonio y a la reducción del tiempo de aislamiento requerido para los desechos radiactivos de actividad alta, mediante el quemado de los radisótopos transuránicos de período largo.

El ulterior desarrollo de los reactores rápidos se centra en el aumento de la seguridad y la economía de la central, y en las mejoras del quemado de combustible y la tecnología del reciclado del combustible para reducir las cantidades de desechos radiactivos. Ejemplos de esos conceptos de desarrollo son el BN-800M de Rusia, el DFBR del Japón, el PFBR de la India, el EFR avanzado europeo, y el LMR desarrollado por General Electric en Estados Unidos.

Los reactores refrigerados por gas están en explotación desde hace muchos años. En el Reino Unido, la electricidad de origen nuclear se genera principalmente en reactores avanzados refrigerados por gas (AGR) y en los Magnox refrigerados por CO₂. Otros países también se han dedicado a desarrollar reactores de alta temperatura (HTGR) refrigerados por helio y con el grafito como moderador. Sin embargo, las centrales prototipo o de demostración construidas no han tenido mucho éxito. No obstante, el gas helio inerte y un diseño especial del combustible permiten a estas centrales funcionar a temperaturas considerablemente superiores a las de los reactores refrigerados por agua; por consiguiente, pueden suministrar el vapor destinado a los generadores convencionales accionados por turbina de vapor, a una temperatura y presión mucho más elevadas o el calor industrial en régimen de alta temperatura para aplicaciones especiales.

Los futuros trabajos de desarrollo de los HTGR se centran en los estudios para mejorar el comportamiento y prolongar la vida útil de las centrales. En particular, se realizan considerables esfuerzos en relación con el ciclo de turbina de gas directo que podría producir una eficiencia térmica muy elevada y costos energéticos reducidos. En el Japón se está construyendo una central de demostración para probar las aplicaciones del calor industrial en régimen de alta

temperatura, mientras que en China ya se comenzó a construir un reactor de ensayo.

Perspectivas de la energía nucleoelectrica

Aunque la energía nucleoelectrica no asegurará por sí sola un suministro seguro y sostenible de electricidad al mundo, ni tampoco será la única forma de reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero, que siguen siendo una importante preocupación respecto del medio ambiente, sí le corresponde una función clave. Los estudios de las emisiones de gases de efecto de invernadero procedentes de diversas cadenas energéticas para la generación de electricidad indican que la energía nucleoelectrica es una de las opciones menos contaminantes. (*Véanse los gráficos.*)

Un requisito previo para lograr la necesaria reactivación de la opción nuclear es la obligatoria mejora del comportamiento técnico y económico de las centrales nucleares. Al mismo tiempo, es menester seguir aumentando la seguridad de las centrales y resolviendo de manera más satisfactoria los problemas relacionados con la gestión y la evacuación de los desechos.

Actualmente, la energía nucleoelectrica es una de las fuentes más baratas de generación de electricidad en muchos países. Sin embargo, su competitividad ha disminuido a causa del bajo precio de los combustibles fósiles y del aumento de los costos de capital de las centrales nucleares que se deben, en gran medida, a los prolongados tiempos de preparación necesarios para la construcción y la concesión de licencias. El alza de los precios del mercado de los combustibles fósiles, en especial del gas, y de los costos de capital y de explotación de las centrales alimentadas por combustibles fósiles, debido a la necesidad de incorporar sistemas de reducción de la contaminación por razones ambientales, podría invertir esta tendencia en el próximo decenio. La ventaja económica de la energía nucleoelectrica puede aumentarse aún más mediante el empeño puesto por los diseñadores de reactores en reducir los costos de capital, simplificando los conceptos de reactores, reduciendo la cantidad de material requerido y acortando los tiempos de construcción. En tal sentido se han logrado notables progresos y se espera obtener mayores beneficios con el despliegue de los reactores avanzados.

El financiamiento de las centrales nucleares continuará siendo un factor clave, en particular en los países en desarrollo. La adaptación tecnológica, el desarrollo de reactores pequeños y medianos, y la aplicación de nuevos enfoques de financiamiento podrían reducir las limitaciones de fondos y facilitar una mayor expansión de la energía nucleoelectrica.

Proyecciones de la energía nucleoelectrica después del año 2000

Proyectar el desarrollo de la energía nucleoelectrica es una labor algo difícil. Una serie de factores pueden influir en las políticas y los procesos de adop-

ción de decisiones, y no es posible evaluar con certeza la ejecución de los programas.

Según estimaciones del OIEA, hasta el año 2000 la potencia nuclear instalada en todo el mundo aumentará hasta alcanzar entre 367 GWe y 375 GWe, frente a los 340 GWe de 1994. Como todas las centrales que se pondrán en servicio a finales de siglo ya están en construcción, el grado de incertidumbre refleja los posibles retrasos en la construcción y la concesión de licencias. En Asia principalmente se conectarán nuevas centrales nucleares a la red eléctrica, mientras que en Europa occidental y América del Norte la potencia nuclear instalada se mantendrá prácticamente igual. En Europa oriental, aunque habrán de terminarse algunas de las centrales en construcción, la transición económica demorará notablemente la ejecución de los programas nucleares en la mayoría de los países.

En el próximo siglo, el grado de incertidumbre respecto del desarrollo de la energía nucleoelectrica es mayor, debido a varios factores de índole técnica, económica, ambiental y política. Las proyecciones, tanto optimistas como pesimistas, de la capacidad de generación nuclear elaboradas por el OIEA hasta el año 2015 se basan en el examen de los proyectos y programas nucleoelectricos de los Estados Miembros. Estas proyecciones denotan que partieron de hipótesis muy distintas, aunque no extremas, de diferentes factores decisivos que influyen en la expansión de la energía nucleoelectrica. Estos factores y las formas en que podrían evolucionar varían de un país a otro. Por ende, las proyecciones del OIEA no reflejan todo el espectro de posibilidades futuras, desde las menos optimistas hasta las más viables, sino que proporcionan un margen verosímil de crecimiento de la capacidad nuclear por región y a nivel mundial.

La proyección menos optimista supone que en los próximos dos decenios prevalecerán los obstáculos que actualmente se interponen a la expansión de la energía nucleoelectrica en la mayoría de los países. Los ritmos de crecimiento económico y de la demanda de electricidad se mantendrán bajos en los países industrializados. Continuará la oposición del público a la energía nucleoelectrica, y las preocupaciones de índole ambiental, como el riesgo de cambio climático global, no se convertirán en factores decisivos en materia de política energética que propicien la sustitución de energía fósil por la nuclear. Los problemas institucionales y de financiamiento impedirán la ejecución de los programas nucleares previamente planificados, sobre todo en los países en transición y en los países en desarrollo, y no habrá mejora radical alguna en cuanto a la adaptación y transferencia de la tecnología nuclear, ni apoyo financiero a los países en desarrollo para la ejecución de los proyectos nucleoelectricos.

Conforme a estas hipótesis, bastante pesimistas, se terminarían la mayoría de las unidades nucleares en construcción pero se encargarían otras nuevas sólo en los países donde la energía nucleoelectrica es uno de los principales componentes de las mezclas de generación de electricidad, como Francia, el Japón y la República de Corea. Debido al gran número de unidades que se pararían al final de su vida útil de explotación prevista, la capacidad nuclear total en el

mundo comenzaría a disminuir después del 2010 y en el 2015 sería similar a la del 2000, es decir, de unos 370 GWe. La participación de la energía nucleoelectrica en el suministro mundial de electricidad se reduciría de un 17% actual a un 13% en el 2015.

La proyección optimista denota una reactivación moderada de la expansión de la energía nucleoelectrica, que podría deberse, en particular, a una evaluación comparativa más amplia de las diferentes opciones de generación de electricidad que incorpore aspectos económicos, sociales, sanitarios y ambientales. En esta proyección se supone que se adoptarían algunas medidas normativas para facilitar la ejecución de estos programas, como el fortalecimiento de la cooperación internacional, el mejoramiento de la adaptación y la transferencia de tecnología y la creación de mecanismos de financiamiento innovadores. En base a estas hipótesis, la potencia nuclear instalada total en el mundo llegaría a unos 515 GWe en el 2015 y la participación de la energía nucleoelectrica en la generación total de electricidad sería de alrededor del 15%.

En ambas proyecciones, la capacidad de producción de la industria nuclear superaría la demanda de nuevos reactores. Un ritmo más elevado de desarrollo de la energía nucleoelectrica sería técnicamente flexible y económicamente viable en una serie de países. Con todo, una reactivación notable de los programas nucleoelectricos exigiría la adopción de medidas normativas, incluida la eliminación de la moratoria *de facto* en varios países y la introducción de mecanismos de financiamiento en apoyo de los proyectos nucleares de los países en desarrollo, cuya ejecución no parece probable a corto plazo.

Otras aplicaciones de la energía nucleoelectrica

Hoy día, sólo unas cuantas centrales nucleares se utilizan para aplicaciones no eléctricas (con una capacidad total de solo 5 GWt para suministrar agua caliente y vapor). Sin embargo, el mercado potencial para las aplicaciones de la energía nuclear en el sector energético no eléctrico puede ser muy amplio. Alrededor del 30% del consumo de energía primaria a nivel mundial se utiliza para generar electricidad, alrededor del 15% se emplea en el transporte y el 55% restante se transforma en agua caliente, vapor y calor. Las aplicaciones no eléctricas abarcan la desalación de agua de mar, la producción de agua caliente para la calefacción urbana y la energía térmica para la refinación de petróleo, la industria petroquímica y la transformación de la hulla o el lignito.

En las aplicaciones no eléctricas, los requisitos concretos de temperatura varían mucho. La producción de agua caliente para la calefacción urbana y de vapor para desalar el agua de mar requiere temperaturas que oscilen entre los 80°C y los 200°C, mientras que para los procesos de refinación de petróleo se necesitan temperaturas que van desde 250° a 550°C. El calor puede emplearse para mejorar la recuperación del petróleo pesado inyectando agua caliente o vapor. La temperatura y presión necesarias para la recuperación de petróleo pesado dependen mucho de las

condiciones geológicas del yacimiento petrolífero; las temperaturas necesarias alcanzan y sobrepasan los 550°C. El tratamiento de los esquistos bituminosos y las arenas alquitranadas exige temperaturas entre 300°C y 600°C y los procesos utilizados en la industria petroquímica requieren temperaturas más altas que fluctúan entre 600°C y 880°C. Se necesitan temperaturas aún más altas (de hasta 950°C) para refinar la hulla o el lignito (por ejemplo, para producir metanol como combustible para el transporte), y se necesitan temperaturas que oscilen entre los 900°C y los 1000°C para producir hidrógeno mediante el proceso de separación del agua.

Los reactores refrigerados por agua pueden suministrar hasta 300°C de calor, y los reactores rápidos refrigerados por metal líquido producen calor hasta unos 540°C. Los reactores refrigerados por gas pueden proporcionar temperaturas incluso más altas, de unos 650°C en el caso de los reactores avanzados refrigerados por gas y moderados por grafito (AGR), y de hasta entre 950°C y 1000°C en el caso de los reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR).

Hay muchos factores que alientan el uso de la capacidad de las centrales nucleares para la cogeneración de electricidad, vapor y calor con fines residenciales e industriales. En la Federación de Rusia, China, Canadá, República Checa, Eslovaquia, Suiza, Alemania, Hungría y Bulgaria, se ha acumulado experiencia en la cogeneración utilizando reactores refrigerados por agua. Uno de los lugares donde se hace mayor uso del vapor nuclear industrial es la Bruce Nuclear Power Development Facility, de Ontario, el Canadá, donde los PHWR Candu pueden producir 6000 MWe de electricidad, así como vapor y calor industriales para la Ontario Hydro y una estación energética industrial colindante.

Un acontecimiento importante en el desarrollo del calor nuclear industrial en régimen de alta temperatura tuvo lugar en marzo de 1991 cuando comenzó la construcción del HTTR (Reactor de ensayo técnico de alta temperatura) en el Oarai Research Establishment del Instituto de Investigaciones de Energía Atómica del Japón. Será el primer reactor nuclear del mundo que se conecte a un sistema de utilización de calor industrial en régimen de alta temperatura.

La energía nucleoelectrica en los países en desarrollo

La mayoría de las centrales nucleares se encuentran en los países industrializados, aunque una serie de países en desarrollo también dependen de la opción nucleoelectrica. A finales de 1995 en los países en desarrollo existían 73 centrales nucleares en explotación (o sea, alrededor del 16% del número total mundial) con una capacidad neta de cerca de 45 GWe (casi el 13% de la capacidad total mundial). La experiencia operacional acumulada de estas centrales es de 850 años-reactor, que

corresponden a un promedio de 11 años de explotación por central.

Ello significa que la energía nucleoelectrica ya es una tecnología establecida en una serie de países en desarrollo. También se prevé que la expansión de la energía nucleoelectrica aumente notablemente en el próximo decenio. Cabe señalar que más de la mitad de las 39 unidades notificadas "en construcción" en 1995 se construyan en países en desarrollo.

Se espera que en los próximos decenios la demanda mundial de energía aumente de manera significativa. La población mundial casi se ha duplicado en los últimos treinta años y continuará aumentando. Según pronósticos, para el año 2020 alrededor de 8000 millones de personas habitarán el planeta, y aproximadamente el 90% o más del crecimiento demográfico se producirá en los países en desarrollo. En estos países, el consumo de electricidad *per capita*, que puede servir de indicador del nivel de vida, es muy bajo, de aproximadamente uno o dos órdenes de magnitud por debajo de los países industrializados.

Sin embargo, el elevado costo de la construcción de centrales nucleares y las limitaciones financieras se han convertido en importantes obstáculos para muchos países en desarrollo. En el caso de los países que ya cuentan con una infraestructura, programas nucleoelectricos establecidos y una capacidad de producción nacional, la situación no es muy difícil, pues sólo necesitan importar los componentes especiales, equipo y conocimientos técnicos, con el correspondiente gasto limitado de divisas.

En la mayoría de los países en desarrollo no existe una infraestructura adecuada ni capacidad de producción y, en general, sus monedas nacionales no son convertibles, lo que significa que cuando importan la mayor parte del equipo de la central tienen que depender en gran medida de préstamos que otorguen bancos e instituciones extranjeras.

En este marco, cabe señalar que al construir la primera central nuclear parece ser preferible optar por el enfoque de entrega tipo "llave en mano", que incluye un programa de transferencia de tecnología. De esa forma habría un máximo de posibilidades de que el primer proyecto de central sea un éxito, lo que resulta de primordial importancia para la aceptación de un programa nuclear. Además, como la transferencia de tecnología, el país podrá desarrollar gradualmente sus propias capacidades, y aumentar de manera sucesiva la participación nacional en próximos proyectos de centrales nucleares.

Algunos países en desarrollo como China, la India y la República de Corea, tienen programas ambiciosos de expansión de la energía nucleoelectrica y también trabajan activamente en el desarrollo de sus propios diseños de reactores. China tiene tres unidades nucleares en explotación, de las cuales una es de diseño propio, y ha encargado en el extranjero otras dos unidades de 950 MWe. También tiene planes de construir un WWER-1000 y negocia la construcción de reactores Candu con AECL del Canadá. El programa a corto plazo incluye la producción en serie de una versión de 600 MWe del PWR de diseño nacional

Función del OIEA en el desarrollo de la energía nucleoelectrónica

Desarrollo de reactores avanzados. Los inicios de la energía nucleoelectrónica tuvieron lugar mayormente sobre bases nacionales. Sin embargo, en el caso de los reactores avanzados, la cooperación internacional está desempeñando una función más importante y el OIEA la promueve en el desarrollo de dichos reactores. Especialmente en el caso de los diseños que incorporan características innovadoras, dicha cooperación puede contribuir de manera significativa a mancomunar recursos y conocimientos técnicos en esferas de interés común para ayudar a sufragar los altos costos del desarrollo. El programa del Organismo en la esfera del desarrollo de la tecnología nucleoelectrónica fomenta el intercambio de información técnica y la cooperación entre los Estados Miembros con importantes programas de desarrollo de reactores. Presta asistencia a los Estados Miembros interesados en los programas de exploración o investigación, y publica informes que pone a disposición de todos los Estados Miembros que se interesen por el estado actual de desarrollo de los reactores. Las actividades se centran en cuestiones fundamentales (por ejemplo, las preocupaciones sobre la seguridad, los elevados gastos de capital, los costosos y complejos procedimientos de explotación) que actualmente obstaculizan una mayor expansión de la energía nucleoelectrónica.

Las actividades del OIEA en el desarrollo de reactores refrigerados por agua, metal líquido o gas corren a cargo de tres grupos internacionales de trabajo (GIT) que son comités constituidos por los encargados de los programas nacionales de estas tecnologías. Cada GIT se reúne periódicamente para servir de foro internacional donde intercambiar información y analizar los informes sobre los progresos de los programas nacionales, identificar esferas de interés común para la colaboración y asesorar al OIEA en lo relativo a sus actividades y programas técnicos. Este examen sistemático se lleva a cabo en un foro de participación abierta en el que se analizan francamente la experiencia operacional y los programas de desarrollo. Se convocan reuniones más pequeñas de especialistas para examinar el progreso en determinadas esferas tecnológicas en que existe interés mutuo. También se celebran reuniones más amplias, simposios o cursos prácticos de comités técnicos con vistas a lograr una participación más general. Los GIT a veces asesoran al OIEA en el establecimiento de programas de cooperación en esferas de interés común a fin de aunar esfuerzos a nivel internacional. Estos esfuerzos de cooperación se realizan mediante los programas coordinados de investigación (PCI). Los PCI generalmente duran de 3 a 5 años y a menudo abarcan actividades experimentales. Estos programas permiten aunar esfuerzos a nivel internacional para desarrollar tecnologías, a un costo inferior al que tendrían si se llevaran a cabo actividades nacionales por separado, y sacar provecho de la experiencia y los conocimientos técnicos de las instituciones participantes.

Capacitación y cualificación del personal de las centrales nucleares. Las actividades del Organismo en esta esfera se han ampliado considerablemente desde 1993. La atención se centra principalmente en la introducción y aplicación de un enfoque sistemático de la capacitación (SAT) del personal para elevar su

cualificación y competencia y, por ende, la seguridad y fiabilidad de las operaciones y el mantenimiento de las centrales. Los órganos reguladores de diversos Estados Miembros han exigido, o recomendado decididamente, que se aplique el enfoque SAT en la capacitación del personal de las centrales nucleares.

En 1994 se creó un Grupo internacional de trabajo sobre la capacitación y cualificación del personal de las centrales nucleares a fin de proporcionar asesoramiento sobre las actividades del OIEA en esta esfera y promover la cooperación mundial. Se ha introducido un nuevo tipo de asistencia del OIEA para la capacitación del personal en virtud del Servicio de Asesoramiento para la Capacitación (TAS). A solicitud de un Estado Miembro o de una central nuclear, el OIEA organiza un TAS con expertos en capacitación de diversos países que proporcionarían asistencia y asesoramiento técnico sobre todos los aspectos de la capacitación, incluido el intercambio de experiencia y prácticas válidas.

Gestión de proyectos de centrales nucleares. El OIEA brinda asistencia a los Estados Miembros que la solicitan en una diversidad de esferas relacionadas con el uso de la energía nucleoelectrónica para la generación segura y económica de electricidad. Esta asistencia se ofrece a las autoridades nacionales, a las organizaciones explotadoras y al personal de la infraestructura industrial que apoya la planificación y ejecución del proyecto nucleoelectrónico.

Un objetivo importante es ayudar a los Estados Miembros en desarrollo a lograr la autosuficiencia nacional en el desarrollo y la mejora sistemáticos de una amplia gama de instalaciones de infraestructura, incluidas las estructuras de organización y su administración, la transferencia de instrumentos y metodologías para la gestión de proyectos y el aprovechamiento de la experiencia adquirida en materia de construcción en proyectos ejecutados con éxito.

No menos importante es el problema de proporcionar recursos humanos cualificados para planificar, reglamentar y ejecutar el programa nucleoelectrónico. Por consiguiente, los programas se apoyan con el objetivo de crear una infraestructura de capacitación nacional independiente que atienda a las necesidades de la industria nuclear. A tal fin, se están ejecutando 10 proyectos para la puesta en marcha de programas nucleoelectrónicos en ocho países de regiones del Oriente Medio, Europa, Asia y el Pacífico.

Para complementar la asistencia que se brinda conforme a cada proyecto, se organizan cursos de capacitación temáticos, talleres y seminarios sobre temas seleccionados por su relación con las necesidades y requisitos concretos de un país. A nivel internacional, se ofrecen periódicamente importantes cursos de capacitación para participantes procedentes de todas las regiones. Estos cursos están diseñados de manera que constituyan una transferencia de tecnología efectiva que ayude a crear una base de personal capacitado en los países en desarrollo. En ellos se abordan temas como el fortalecimiento de la gestión de proyectos, la garantía de calidad en la explotación y el mantenimiento de las centrales nucleares, la cualificación del personal de operaciones de éstas y las actividades de control e instrumentación que en ellas se realizan.

que se explota en Quinshán y su ulterior desarrollo; la construcción de un reactor de diseño propio para generar calor, y la construcción de un reactor de ensayo en régimen de alta temperatura.

La India tiene 10 centrales en explotación, de las cuales seis son PHWR de diseño propio, y otras cuatro en construcción. Las actividades de desarrollo se centran en un PHWR de 500 MWe y un reactor reproductor rápido refrigerado por sodio de 500 MWe.

La República de Corea tiene 11 unidades en explotación, suministradas todas por vendedores extranjeros. Con sus últimas unidades, el país ha comenzado una nueva era al poner en línea la primera de una serie de centrales basadas en el System 80 de ABB Combustion Engineering, a la cual las compañías coreanas suministran cada vez más servicios de diseño, técnica y equipo. Se están construyendo cinco centrales de esta serie y de otro tipo, y se han preparado otras 11 para los años que restan hasta el año 2006. También se ha comenzado a desarrollar el reactor de la siguiente generación, cuya entrada en funcionamiento está prevista para el 2006.

Cabe mencionar también algunos otros acontecimientos: el suministro a la República Popular Democrática de Corea de dos centrales PWR de Korean Standard Nuclear Power Plant; los planes bastante firmes de Indonesia de introducir la energía nucleoelectrica dentro de algunos años; el interés de Tailandia en la energía nucleoelectrica; el deseo de la República Islámica del Irán de obtener apoyo para terminar las unidades de Bushehr; la construcción de un PWR de 300 MWe en el Pakistán y los debates sobre la posibilidad de construir una segunda unidad de ese tipo; el deseo de Marruecos de iniciar un estudio de viabilidad sobre la desalación de agua de mar utilizando el calor de origen nuclear; y los planes de Egipto de utilizar la energía nucleoelectrica.

En Europa oriental, Armenia ha puesto de nuevo en explotación una de sus centrales nucleares; la República Checa tiene dos unidades en construcción; en Rumania se construyen cuatro unidades; en la República Eslovaca cuatro, y en Ucrania dos unidades (con planes de construir seis).

En América Latina, la Argentina y el Brasil tienen, respectivamente una unidad en construcción y la primera también está desarrollando diseños propios de reactores nucleares. México explota dos centrales, pero no tiene planes concretos de construir otras. A principios de los años ochenta, México tenía un programa de desarrollo nucleoelectrico muy ambicioso que tuvo que abandonar por razones financieras. Cabe también mencionar que Venezuela ha estado analizando el empleo de centrales nucleares para generar calor y electricidad; el calor se utilizaría para mejorar la extracción de petróleo pesado en el río Orinoco.

Retos y perspectivas

Las perspectivas de la energía nucleoelectrica deben evaluarse en el contexto de la creciente demanda de electricidad y de la mayor conciencia que se tiene de los problemas ambientales. La energía nucleoelectrica sola no resolverá todos los problemas, pero formará parte de las soluciones.

En el corto plazo, los proyectos nucleoelectricos se ejecutarán principalmente en países de Asia, incluidos China, Japón y la República de Corea. En muchas otras regiones del mundo la explotación segura y fiable de las centrales nucleares, las soluciones convincentes a los problemas de almacenamiento y evacuación de desechos nucleares de actividad alta, y un proceso predecible de concesión de licencias son requisitos previos esenciales para la reactivación y expansión de la energía nucleoelectrica.

Hoy día, las tendencias del consumo energético reflejan la importante función que la electricidad desempeña en los esfuerzos encaminados hacia la modernización y en la mejora del uso total de la energía y el aumento de la eficiencia. Es también cada vez más evidente que la plena participación en la era de la información y las comunicaciones exige fuentes de electricidad fiables. Los estudios han demostrado que existe una clara correlación entre las tendencias del consumo de electricidad y la producción económica nacional en una amplia diversidad de países. De 1960 a 1990, la participación de la electricidad en el consumo mundial de energía ha crecido del 17% al 30% y el consumo anual de electricidad *per capita* casi se ha triplicado (de 765 a 2225 kWh por persona). Con todo, 2000 millones de personas en el mundo carecen de electricidad en sus hogares.

Para los años venideros, resulta bastante obvio que el consumo *per capita* de electricidad en los países en desarrollo tendrá que crecer sustancialmente para mantener el crecimiento económico y mejorar los niveles de vida. El movimiento acelerado hacia la urbanización, que facilita el acceso a los sistemas de distribución de electricidad, conjuntamente con la electrificación de las zonas rurales, también contribuirán a que la energía eléctrica tenga una función cada vez mayor. En la República de Corea, donde la energía nucleoelectrica ya es una de las principales productoras, el consumo de electricidad *per capita* ha crecido de 70 kWh anuales en 1960 a casi 3200 kWh anuales en 1992.

En los próximos decenios, el proyectado crecimiento de la población de la Tierra, principalmente en los países en desarrollo, elevará la demanda de suministros de energía y electricidad. Según el Consejo Mundial de Energía, cabe esperar que el consumo mundial de electricidad aumente entre el 50% y el 75% en el año 2020. Evidentemente es posible que la energía nucleoelectrica desempeñe una importante función como fuente de electricidad segura y no contaminante que ayude a los países a satisfacer sus futuras necesidades energéticas.