

GC

GC(46)/INF/5
5 de agosto de 2002

Distr. GENERAL

ESPAÑOL

Original: INGLÉS

Organismo Internacional de Energía Atómica
CONFERENCIA GENERAL

Cuadragésima sexta reunión ordinaria
Punto 15 del Orden del Día provisional
(GC(46)/1)

EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR 2002

1. En respuesta a peticiones formuladas por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada dos años un amplio *Examen de la tecnología nuclear*, y un suplemento más corto en los años intermedios. El presente informe es el segundo documento amplio y ofrece una perspectiva mundial de las tecnologías nucleares, tanto para las aplicaciones eléctricas como no eléctricas.
2. El ETN-2002 contiene un Resumen Ejecutivo y pasa revista a las siguientes esferas: aspectos fundamentales del desarrollo nuclear; energía nucleoelectrónica, ciclo del combustible y gestión de desechos; aplicaciones en materia de alimentos, agua y salud; y aplicaciones en las esferas del medio ambiente y los procesos industriales sostenibles.
3. El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida posible, observaciones concretas de la Junta y otras recibidas de los Estados Miembros.

Por razones de economía, sólo se ha publicado un número limitado de ejemplares del presente documento. Se ruega a los delegados que lleven a las reuniones sus propios ejemplares de los documentos.

EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR 2002

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	4
PARTE I. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL DESARROLLO NUCLEAR	7
I-1. DATOS NUCLEARES, ATÓMICOS Y MOLECULARES	7
I-2. REACTORES DE INVESTIGACIÓN, ACELERADORES Y RADIOISÓTOPOS	9
I-2.1. Reactores de investigación	9
I-2.2. Aceleradores	11
I-2.3. Radioisótopos	13
I-3. INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR	14
I-4. FUSIÓN NUCLEAR	15
PARTE II: ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA, CICLO DEL COMBUSTIBLE Y GESTIÓN DE DESECHOS	17
II-1. PANORÁMICA MUNDIAL DE LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA	17
II-1.1. Estudio nacional y regional	17
II-1.2. Aceptación pública	21
II-2. EXAMEN DE LAS CUESTIONES FUNDAMENTALES	25
II-2.1. Aumento de la demanda de energía y electricidad	25
II-2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático	28
II-2.3. Competitividad económica	30
II-2.4. Diseños avanzados	33
II-2.5. Combustible gastado y desechos radiactivos	41
PARTE III APLICACIONES EN MATERIA DE ALIMENTOS, AGUA Y SALUD	47
III-1. AGRICULTURA SOSTENIBLE E INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS	47
III-1.1. Mejora de los cultivos	47
III-1.2. Aumento de la productividad del ganado	49
III-1.3. Inocuidad de los alimentos	50

III-2. RECURSOS HÍDRICOS	51
III-3. SANIDAD HUMANA	53
III-3.1. Aplicaciones de diagnóstico	53
III-3.2. Aplicaciones terapéuticas	55
III-3.3. Nutrición	58
PARTE IV APLICACIONES EN LAS ESFERAS DEL MEDIO AMBIENTE Y LOS PROCESOS INDUSTRIALES SOSTENIBLES	61
IV-1. PROTECCIÓN MARINA Y TERRESTRE	61
IV-1.1. Medio ambiente marino	61
IV-1.2. Medio ambiente terrestre	63
IV-2. REMOCIÓN DE MINAS	64
IV-3. MEJORA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES	65
REFERENCIAS	68

RESUMEN EJECUTIVO

1. El tema unificador del ETN-2002 es la importancia de la innovación. La innovación permite ir más allá de mejoras incrementales y evolutivas limitadas por rendimientos decrecientes. Por ejemplo, en el caso de la producción de cultivos y la sanidad humana, la técnica de los insectos estériles abrió todo un nuevo campo para futuras mejoras, muy diferentes de la aplicación de cantidades cada vez mayores de plaguicidas. Las técnicas nucleares representan un nuevo método, más seguro, para eliminar los aproximadamente 60 millones de minas terrestres abandonadas en todo el mundo. Nuevas técnicas de gran precisión dan la posibilidad de efectuar tratamientos del cáncer cada vez menos intrusivos y más eficaces.
2. En cuanto a la energía nucleoelectrica, la innovación constante será un factor clave para cerrar la “brecha de proyección” entre los escenarios energéticos mundiales a largo plazo en los cuales la energía nucleoelectrica se expande considerablemente y los escenarios a corto plazo en los que hay sólo una modesta expansión, o incluso una reducción. En los primeros se supone que las tecnologías nucleares, al igual que las demás tecnologías, no son estáticas. Progresan gracias a las mejoras evolutivas e innovadoras. Por el contrario, la innovación tecnológica es de importancia mucho menor para los escenarios a corto plazo. Si bien el progreso que se da por descontado en los escenarios a largo plazo es coherente con las tendencias históricas, no se producirá de forma automática. Requiere iniciativa y acción para mantener y ampliar una “cultura de innovación” en toda la industria nuclear y las entidades reguladoras.
3. Aunque el ETN-2002 presenta una panorámica mundial del estado actual de la ciencia y la tecnología nucleares, y no un informe anual de las actividades del OIEA, señala aquellas esferas en las que el Organismo desempeña una función particularmente importante.
4. En la Parte I del ETN-2002, “Aspectos fundamentales del desarrollo nuclear” se pasa revista a los acontecimientos en tres esferas: nuclear, atómica y de datos moleculares. Los nuevos adelantos nucleares, desde los ciclos del combustible innovadores hasta la detección de minas terrestres, requieren un acceso fácil y rápido a los datos nucleares. Las bibliotecas y bases de datos del Organismo son un elemento central para proporcionar ese acceso.
5. Los reactores de investigación siguen siendo esenciales para el progreso en la ciencia y tecnología nucleares. En la Parte I se examinan los adelantos en la producción de radioisótopos, la utilización de aceleradores y el análisis por activación neutrónica en relación con aplicaciones en campos que abarcan desde la medicina - particularmente la lucha contra el cáncer - hasta la industria. En la Parte I se examinan también los adelantos en la instrumentación nuclear y la fusión nuclear, especialmente en relación con el reactor termonuclear experimental internacional.
6. La Parte II empieza con un resumen de la producción de energía nucleoelectrica en 2001. A finales de 2001 había 438 centrales nucleares (CN) en funcionamiento, lo que correspondía a una potencia total de 353 GW(e), o sea, más de 10 000 años-reactor de experiencia de explotación acumulativa y alrededor del 16% de la producción mundial de electricidad. Sin embargo, sólo dos nuevas CN entraron en funcionamiento en 2001.
7. La mayoría de las nuevas CN en construcción están en Asia o en las economías en transición. El hecho de que no se emprendan nuevas actividades de construcción ni en América del Norte ni en Europa occidental se atribuye a la economía y a factores de política y temores del

público en relación con el combustible gastado y la seguridad. En la Parte II se examinan los progresos recientes y las perspectivas en cada esfera, señalándose nuevas políticas energéticas, tanto en los Estados Unidos de América como en la Federación de Rusia, que apoyan un poco más la energía nucleoelectrica, y exámenes de la política en el Reino Unido y la Comisión Europea.

8. En la Parte II se pasa revista asimismo a los conceptos del ciclo del combustible nuclear y los reactores innovadores y se examinan los aspectos de economía, seguridad, combustible gastado y temores en cuanto a la proliferación en los diferentes países. El proyecto internacional del Organismo sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) y el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) iniciado por los Estados Unidos de América son foros para la cooperación internacional sobre conceptos innovadores, que se complementan en gran medida. Ambas iniciativas empezaron en el año 2000. La Carta de constitución del GIF se firmó en el verano de 2001. Luego de una reunión inicial de las partes interesadas en noviembre de 2000, se aprobó la Fase I del plan de trabajo del INPRO durante la primera reunión de su Comité Directivo celebrada en mayo de 2001. El apoyo a la iniciativa del OIEA se incorporó en una resolución de la Conferencia General de septiembre de 2001 y en la resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas de diciembre de 2001 relativa al Informe del OIEA. En la segunda y tercera reuniones del Comité Directivo del INPRO, celebradas en diciembre de 2001 y mayo de 2001, se supervisaron los progresos y se proporcionaron orientaciones para los preparativos del informe sobre la fase 1 A.

9. Las negociaciones internacionales sobre el cambio climático y el desarrollo sostenible dieron resultados mixtos para la energía nucleoelectrica en 2001. En el noveno período de sesiones de la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CSD-9), los países acordaron manifestarse en desacuerdo sobre el papel de la energía nucleoelectrica en el desarrollo sostenible. Sin embargo, hubo consenso en el sentido de que la decisión de optar por la energía nuclear incumbe a los países. Durante el séptimo período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP7) se acordó el reglamento para la aplicación del Protocolo de Kyoto, el que contó con el apoyo del número suficiente de las Partes para proceder a su entrada en vigor. Se trata de un paso importante para asignar un valor económico tangible al hecho de que con la energía nucleoelectrica se evita la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el acuerdo de la COP7 excluye los proyectos de energía nucleoelectrica de dos de los tres mecanismos de flexibilidad del Protocolo, a saber, la aplicación conjunta y el mecanismo del desarrollo limpio.

10. En la Parte III se examinan los usos cada vez más amplios de los isótopos y la radiación, incluidas las mejoras en los cultivos mediante las mutaciones, las técnicas de evaluación de aumentar la producción de alimentos y la utilización más difundida de la técnica de los insectos estériles (TIE) para reducir las pérdidas de alimentos y el uso de plaguicidas. La TIE también puede ayudar a combatir las enfermedades del ganado al controlar las plagas portadoras de enfermedades. El éxito alcanzado en la erradicación de la mosca tsetsé en Zanzíbar ha alentado la ejecución de otros proyectos piloto de la TIE en África.

11. La inocuidad de los alimentos mediante la irradiación va en beneficio de la salud humana y el comercio. Se examinan las actividades y tendencias internacionales, con referencia a las técnicas de radioinmunoanálisis, que tienen en cuenta las inquietudes cada vez mayores con respecto a los residuos de fármacos veterinarios y la contaminación de los alimentos.

12. La rapidez con que está aumentando la utilización de la hidrología isotópica y las actividades de colaboración internacional son partes importantes de los esfuerzos mundiales para atender a las crecientes necesidades de agua dulce. Además, la desalación del agua de mar mediante el uso de la energía nuclear es una fuente potencialmente inmensa de agua dulce. El interés actual va impulsado por la mayor demanda mundial de agua dulce, por las inquietudes en torno a las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación derivada de los combustibles fósiles, así como por los adelantos en los reactores de pequeña y mediana potencia que podrían ser más adecuados para la desalación que los reactores de potencia de gran tamaño.

13. El ritmo actual de la innovación es particularmente rápido en las aplicaciones de las tecnologías nucleares en la esfera de la salud humana. La Parte III abarca los adelantos tecnológicos en radiología de diagnóstico, esferas especializadas de la medicina nuclear y datos y tendencias mundiales en relación con el tratamiento del cáncer por medio de radioterapia y radiofármacos. En la Parte III también se informa sobre los adelantos recientes en las aplicaciones nucleares e isotópicas para la vigilancia de la nutrición, que reciben cada vez mayor aceptación como técnicas de investigación y diagnóstico.

14. En la Parte IV se examina el empleo de las técnicas nucleares para la utilización segura y en condiciones sanitarias de los recursos marinos. El Organismo, en colaboración con otras organizaciones internacionales, mejora y aplica técnicas de trazadores radiológicos para la investigación de los contaminantes de las aguas costeras, la salud de las marismas, los impactos marinos sobre los recursos de agua dulce y las industrias pesqueras. Las investigaciones indican que se debería asignar gran prioridad a la gestión de la zona costera y las descargas de aguas subterráneas submarinas. Se han iniciado programas de acción a nivel mundial en los que se utilizan trazadores isotópicos radiactivos para la vigilancia de las tendencias oceanográficas. Asimismo, el empleo de las técnicas analíticas nucleares para vigilar la contaminación del medio ambiente terrestre es ahora una práctica aceptada.

15. Para los países plagados de minas terrestres que quedaron abandonadas tras conflictos armados, se está investigando una prometedora técnica para el desminado humanitario en la que se utiliza el análisis por neutrones pulsados térmico-rápidos. En breve se pondrán a prueba sobre el terreno y cabe esperar que como resultado los trabajos de desminado sean más rápidos y seguros.

16. En la Parte IV se examinan también las aplicaciones de los radioisótopos y la radiación en la industria para aclarar la función que desempeñan. Esas aplicaciones se han vuelto indispensables y es probable que se hagan extensivas a un número aún mayor de usos industriales.

PARTE I**ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL DESARROLLO NUCLEAR****I-1. DATOS NUCLEARES, ATÓMICOS Y MOLECULARES**

Los datos nucleares describen las propiedades de los núcleos atómicos y sus interacciones con partículas incidentales como neutrones, fotones y partículas cargadas. Los datos atómicos y moleculares describen las interacciones de los átomos y las moléculas con los electrones libres, las partículas pesadas tales como protones y partículas alfa, y la interacción de los componentes del plasma con los materiales de la pared en los dispositivos de fusión. Las actividades principales en relación con las mediciones y evaluaciones de datos atómicos y nucleares se concentran a nivel de los programas nacionales. El trabajo de coordinación de la elaboración de los datos nucleares está a cargo del Grupo de Trabajo sobre la cooperación internacional para la evaluación de datos (WPEC), creado por la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), e integrado por los países de la OCDE así como por China y Rusia, que tienen importantes programas de datos nucleares. Como miembro del WPEC, el OIEA representa colectivamente a los demás países en este grupo. El Subcomité de datos atómicos y moleculares (A+M) del Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión del OIEA coordina las actividades sobre datos atómicos y moleculares. Este gran cúmulo de información constituye una sola reserva, a la que se puede acceder a través de cualquiera de los centros de difusión. Estos centros cooperan por intermedio de redes oficialmente establecidas, que celebran reuniones periódicas. La finalidad de las redes es mantener bases de datos, coordinar los formatos de las bases de datos y de los programas de recuperación de información, e intercambiar datos de modo que todos los usuarios tengan información completa, independientemente de su ubicación geográfica. En la actualidad 13 centros de datos sobre reacción nuclear y más de 20 centros de datos sobre desintegración y estructura nuclear constituyen dos redes de centros de cooperación para datos nucleares. En el Cuadro I-1 [1] se indica la situación actual de las bases de datos de la red.

Cuadro I-1. Situación de las bases de datos nucleares, atómicos y moleculares del OIEA

Base de datos, biblioteca de datos	Volumen actual
Información bibliográfica	Más de 400 000 entradas
Datos sobre reacciones nucleares experimentales	80 344 conjuntos de datos, 6 162 935 datos puntuales
Bibliotecas de reacciones nucleares evaluadas	6 bibliotecas nacionales e internacionales, 516 archivos en bibliotecas de datos para fines generales y más de 15 000 archivos en bibliotecas especializadas
Datos sobre desintegración y estructura nuclear evaluados	293 cadenas de masas, cada una de las cuales contiene de 3 a 37 nucleidos
Datos sobre producción de isótopos	48 de las reacciones más importantes
Datos bibliográficos A+M	Más de 39 000 entradas
Datos numéricos A+M	Más de 4 000 reacciones representadas

En todos los centros, los CD ROMS o Internet están reemplazando a las cintas magnéticas, telnet y documentos impresos. El número total de peticiones atendidas por año en relación con datos nucleares del centro del OIEA se indica en la Fig. I-1. El número de peticiones de datos atómicos y moleculares es comparable.

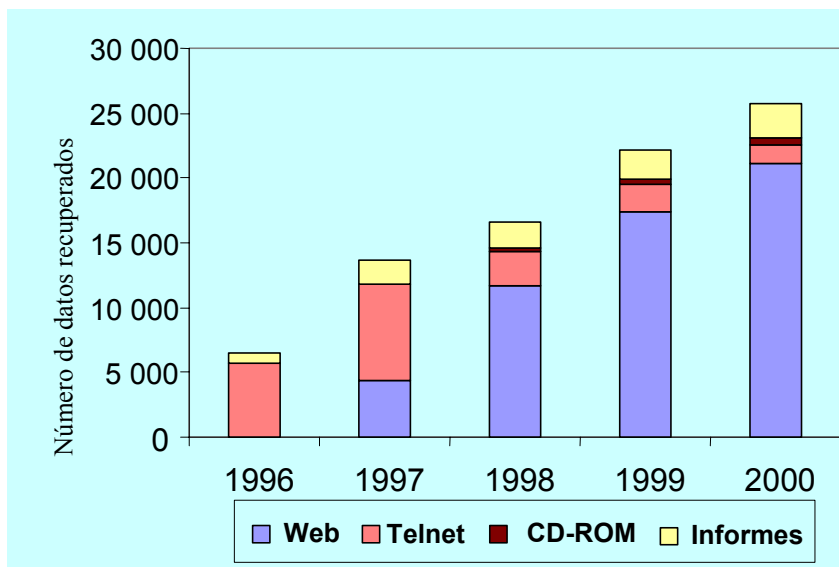


Figura I-1. Recuperación de datos nucleares del centro de datos del OIEA

El OIEA es la principal fuente de información en esta esfera para un gran número de Estados Miembros, particularmente países en desarrollo. Además de las bibliotecas de datos elaboradas por los Estados Miembros, el OIEA ha coordinado el desarrollo de nuevas bibliotecas mediante la cooperación internacional, tales como:

- La biblioteca FENDL-2 de datos nucleares evaluados, que se ha adoptado a nivel mundial para estudios de fusión nuclear, incluidos los realizados para el proyecto del reactor termo-nuclear experimental internacional;
- La biblioteca de datos fotonucleares del OIEA, que es la primera recopilación internacional de datos que describen interacciones complejas de fotones con nucleidos;
- La biblioteca de parámetros de referencia para entrada de datos para códigos de modelos nucleares, que ofrece a los evaluadores un conjunto singularmente identificable de datos de entrada, con enlaces integrados a varios códigos de modelos nucleares de uso frecuente;
- La base de datos AMBDAS, que contiene datos bibliográficos para procesos atómicos y moleculares (A+M), importantes para la investigación en fusión nuclear;
- La base de datos numéricos ALADDIN para datos A+M, también importantes para la investigación en fusión nuclear.

Los requisitos en evolución de las nuevas tecnologías determinan la orientación del futuro volumen de las bases de datos y del desarrollo de las bibliotecas de datos. Estas nuevas iniciativas incluyen datos sobre conceptos de reactores y ciclos del combustible innovadores, sistemas accionados por aceleradores para generación de electricidad o incineración de desechos radiactivos, dispositivos de fusión, tratamiento médico, diagnóstico con haces de radiación, optimiza-

ción de la producción de isótopos, ensayos de materiales no destructivos, geología, petróleo y exploración de minerales y detección de minas terrestres.

I-2. REACTORES DE INVESTIGACIÓN, ACELERADORES Y RADIOISÓTOPOS

En 2001 los materiales radiactivos, excluidos los que se relacionan con la generación de electricidad, que se utilizaron en el sector industrial representaron un valor de ventas de 330 700 millones de dólares, de acuerdo con estimaciones del Instituto de Energía Nuclear de los Estados Unidos [2]. Una estimación comparable para el Japón asciende a 69 500 millones de dólares [3]. Las tecnologías basadas en aceleradores, es decir, procesamiento con haces iónicos y radioprocesamiento para polimerización, son procesos clave en las industrias de neumáticos para automóviles y de semiconductores.

I-2.1. Reactores de investigación

Actualmente hay 277 reactores de investigación en funcionamiento, más otros 17 previstos o en construcción [4]. El número de reactores de investigación en explotación en los países desarrollados alcanzó su nivel más alto - 328 - en el año 1975 y actualmente hay 192 (véase Fig. I-2). El número de reactores en explotación en los países en desarrollo ha ido en aumento, y actualmente son 85.

Las pautas de utilización de los reactores de investigación, que durante sus tres primeros decenios se orientaban al suministro de información vital en física nuclear y al apoyo al desarrollo de los reactores de potencia, apuntan ahora hacia la enseñanza, la investigación para el desarrollo de materiales y la producción de radioisótopos. Con la disminución de la demanda de investigaciones nucleares fundamentales, un importante número de reactores de investigación en explotación se ha convertido en instalaciones cuyos servicios pueden contratarse para la producción de radioisótopos, radiografía, doping de semiconductores y análisis por activación neutrónica para una amplia gama de usuarios. También continúan con su función tradicional en la enseñanza y la capacitación.

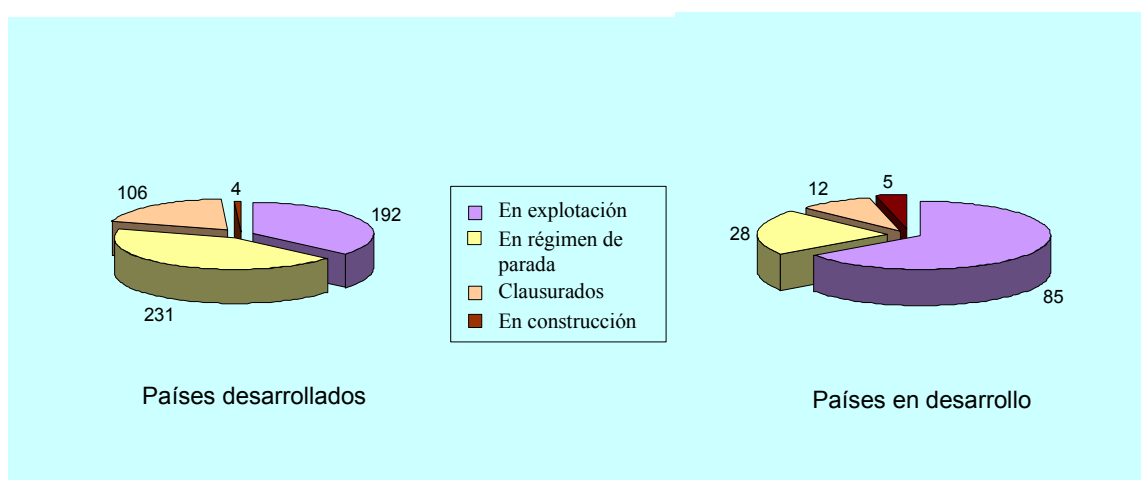


Figura I-2. Situación operacional de los reactores de investigación en el mundo

Los reactores de investigación se han construido sobre la base de docenas de diseños diferentes que utilizan diversos tipos de combustible. Un gran porcentaje de los reactores de investigación en explotación actualmente tienen una potencia térmica máxima de 100 kW, o menos. En los países en desarrollo, 33 de 85 pertenecen a esta categoría, como se indica en la Fig. I-3. También se puede observar en esta figura la distribución por edades de los reactores de investigación instalados en los países en desarrollo. Los reactores pequeños tienen núcleos que no requieren una recarga frecuente y la cuestión de la disposición final del combustible gastado es menos importante. Con el fin de reducir, y eventualmente eliminar, el comercio de uranio muy enriquecido para los reactores de investigación, los Estados Unidos de América establecieron el Programa de enriquecimiento reducido para reactores de investigación y ensayo, que ha tenido el apoyo del Organismo desde su creación, y en el que también participa ahora la Federación de Rusia.

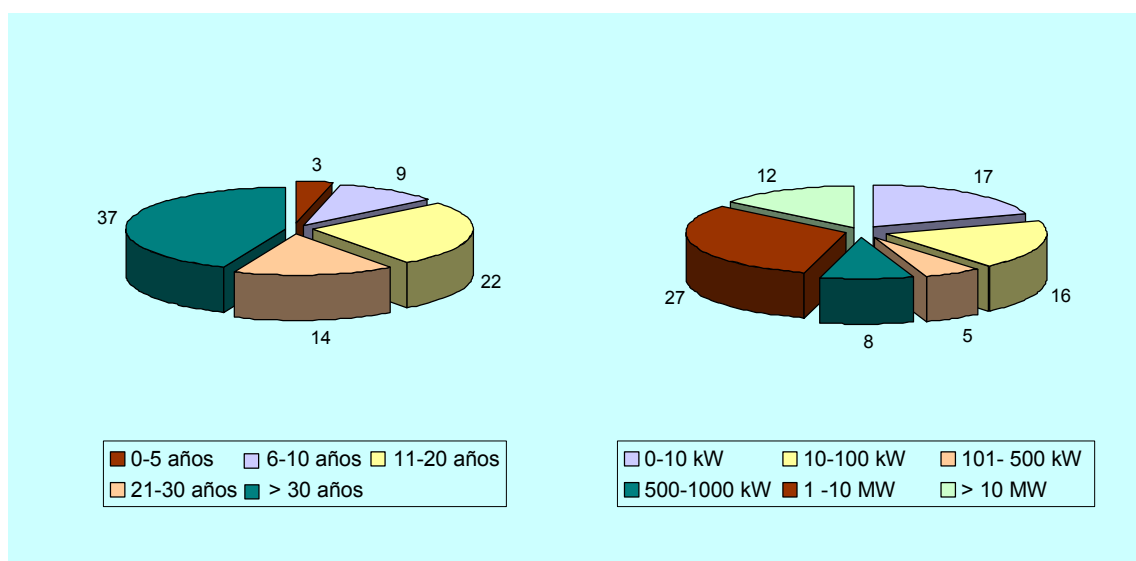


Figura I-3. Distribución por edad y potencia de los reactores de investigación de los países en desarrollo

Los isótopos se producen principalmente en reactores con niveles de potencia de 1 MW, o más. Actualmente 73 reactores producen radioisótopos, de los cuales seis son de alto flujo ($>5 \times 10^{14}$ n/cm²/seg). Se usan también algunos reactores de potencia (principalmente para producción de cobalto 60). La distribución por potencia de los reactores productores de isótopos en los países miembros y no miembros de la OCDE se indica en la Fig. I-4. Como se puede ver, aproximadamente la mitad de los reactores tienen una potencia del rango de 5-30 MW. Del total, más o menos la mitad tiene más de 35 años, pero el 30% de ellos ha sido modernizado/mejorado. Dos reactores, en Australia y Francia, se pondrán en régimen de parada y serán reemplazados por nuevos reactores. El Canadá también tiene previsto construir un reactor de alto flujo (3×10^{15} n/cm²/seg), a un costo estimado de 466 millones de dólares, para el estudio de materiales.

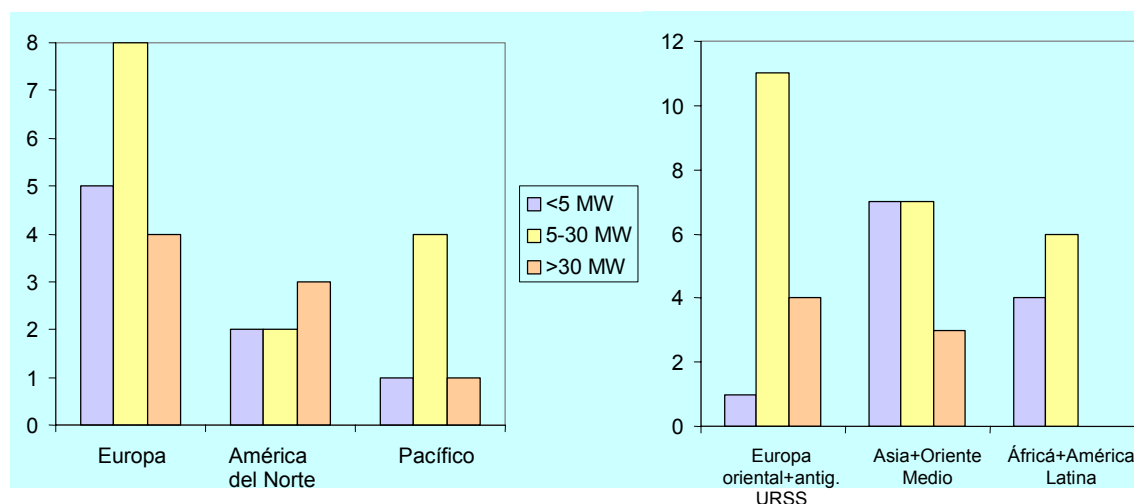


Figura I-4. Número y distribución por potencia de reactores productores de isótopos en países miembros y no miembros de la OCDE

Se prevé que en el futuro se recurrirá ampliamente al uso de reactores de investigación de alta calidad al proseguir la competencia entre los investigadores por el acceso a líneas de irradiación con los más altos flujos neutrónicos y con fuentes neutrónicas frías. También continuará en aumento el uso de muchos reactores de investigación con una capacidad de rendimiento moderada debido a que se podrán aprovechar para ciertas aplicaciones especializadas y regionales, como la utilización de semiconductores, circuitos de prueba para simular condiciones de los reactores de potencia, producción de radioisótopos y análisis por activación neutrónica. Al mismo tiempo, muchos reactores de investigación seguirán desempeñando una función en la capacitación de los científicos e ingenieros que serán fundamentales para el desarrollo de la energía nucleoelectrónica. Es probable que se proceda a la parada de los reactores subutilizados de mayor antigüedad y se necesitarán fondos para la clausura de los reactores actualmente en régimen de parada. (Normalmente un reactor TRIGA de 1 MW de potencia requeriría aproximadamente 1 a 2 millones de dólares para su clausura.) En la actualidad se construyen nueve reactores de investigación nuevos y está prevista la construcción de ocho más, incluido un reactor para fines múltiples en Australia y un FRM II en Alemania que estará dedicado esencialmente a la investigación por haces neutrónicos. Los reactores MAPLE construidos recientemente en el Canadá se utilizarán fundamentalmente como fábricas de isótopos para usos comerciales para producir sobre todo ^{99}Mo .

I-2.2. Aceleradores

Aunque los aceleradores de partículas se utilizaron inicialmente para estudios sobre física nuclear y de partículas, hoy en día se emplean en diversas esferas de investigación y tecnología. Hay alrededor de 15 000 aceleradores actualmente instalados en todo el mundo, y las instalaciones crecen a un ritmo de unos 700 nuevos aceleradores anuales [5]. En la Figura I-5 se proporciona información detallada sobre el uso de aceleradores, clasificados por categorías.

Las aplicaciones principales de los aceleradores son la implantación de iones y/o el procesamiento de superficies con iones, así también la terapia del cáncer (Fig. I-5). Para este tipo de terapia se ha difundido mucho el uso de aceleradores lineales de electrones que, en términos del número de aparatos, registra un crecimiento del orden de 400 o 500 unidades al año. Los acele-

radores de electrones son también el apoyo principal de la industria de polímeros de alto grado, además de que se están encontrando cada vez más aplicaciones en lo referente a la esterilización de productos médicos y la irradiación de alimentos (véanse también las Partes III y IV). Hay 243 aceleradores (ciclotrones, principalmente) que se emplean para la producción de radioisótopos, de los cuales 211 se encuentran en países de la OCDE. De este total, 56 aceleradores están dedicados a la producción de isótopos en general, 159 a la producción de isótopos para tomografía con emisiones de positrón (PET) y 28 ciclotrones son máquinas no dedicadas.

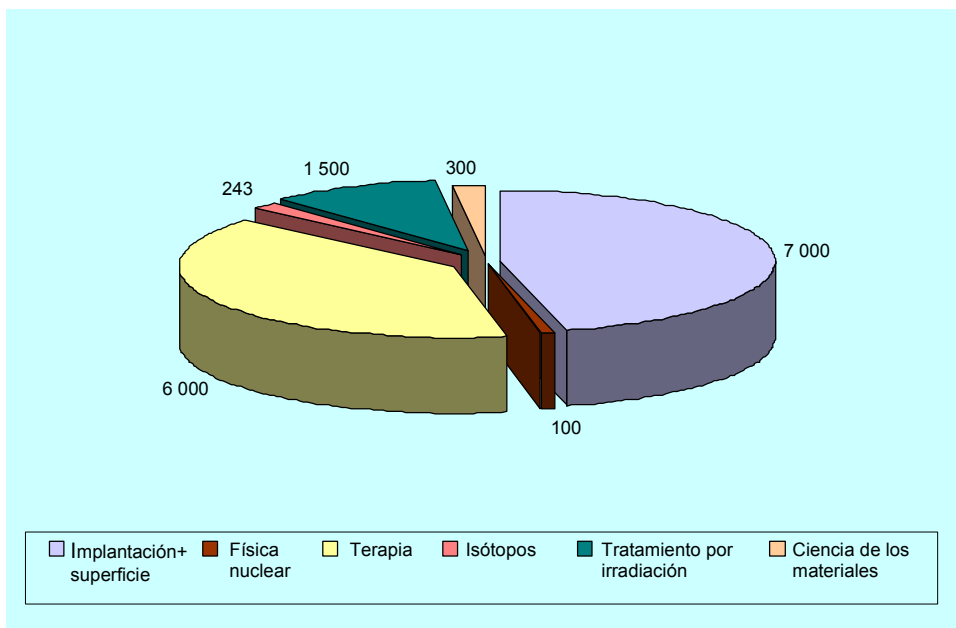


Figura I-5. Utilización de aceleradores de partículas

Los aceleradores de electrones de alta energía (de varios GeV) sirven como fuentes brillantes de luz sincrotrónica. El uso de la irradiación sincrotrónica para investigaciones en ciencia y tecnología ha registrado un enorme crecimiento en los dos últimos decenios, y suman más de 5 000 los investigadores que sólo en Europa la utilizan ahora con regularidad. La potencia mundial ha pasado de prácticamente cero en 1970 a 2 millones de horas de líneas de irradiación al año. En 1999 había unos 45 aceleradores que funcionaban como fuentes de luz sincrotrónica. Trece más están en fase de construcción y alrededor de 19 se encuentran en etapa de diseño o de propuesta. En los países en desarrollo, hay un mínimo de siete aceleradores de gran escala en funcionamiento o que en los próximos años se tiene previsto poner en servicio con fines de irradiación sincrotrónica. Entre las aplicaciones principales figuran la investigación en ciencias biológicas con el propósito de entender, por ejemplo, la estructura de genes y virus.

En todo el mundo se utilizan unos 200 aceleradores para la caracterización radioanalítica de materiales. Además, están en etapa de desarrollo algunos sistemas de aceleradores pequeños que servirán para detectar explosivos y estupefacientes.

Mirando hacia el futuro, se registra un crecimiento constante del número de aceleradores en funcionamiento y continúan abriéndose nuevas esferas de aplicaciones prometedoras. Entre éstas se cuenta el desarrollo de nuevos materiales, estudios sobre contaminación ambiental, investigación biomédica, geología y arqueometría. La espectrometría de masas por acelerador (AMS) es la técnica de análisis de trazas más sensible de las disponibles actualmente y se prevé que su uso con este fin será cada vez más frecuente en oceanografía, paleoclimatología y geohidrología.

Las fuentes neutrónicas de espalación, basadas en aceleradores de protones de alta energía, conforman otra esfera de crecimiento en lo referente a los aceleradores. Se prevé un aumento del número de fuentes neutrónicas de espalación a causa de la demanda sostenida de haces neutrónicos intensos. Hay actualmente cinco fuentes neutrónicas de espalación en funcionamiento, y tres más se encuentran en etapa de construcción o de planificación (en los Estados Unidos y el Japón),

I-2.3. Radioisótopos

De un total aproximado de 800 radioisótopos conocidos, se ha generalizado el uso de más de 150 para una variedad de aplicaciones. Éstos se producen en unos 73 reactores y en 243 aceleradores mediante la irradiación de objetivos idóneos que a continuación se procesan en instalaciones radioquímicas especiales con el objeto de elaborar productos para diferentes aplicaciones. En el cuadro I-2 se proporciona una lista de aplicaciones principales y de los radioisótopos utilizados.

Como se expone en la Sección III-3 relativa a aplicaciones en materia de sanidad humana, hay compuestos radiomarcados especiales (radiofármacos) que se concentran en determinados órganos y que pueden ayudar a los médicos a detectar afecciones o metástasis en algunos órganos y huesos. Se ha generalizado el uso de métodos inmunométricos basados en radioisótopos para determinar la concentración de hormonas, estupefacientes, etc. en la sangre y en otros humores orgánicos. Los radioisótopos también son de fundamental importancia para la investigación médica. Casi el 30% del total de las investigaciones biomédicas lleva aparejado el uso de radioisótopos. Un 80% de los medicamentos aprobados por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos son el resultado de investigaciones con radioisótopos.

De cara al futuro, y habida cuenta de las numerosas técnicas que ejercen una influencia importante bien sea en la actividad industrial o en la atención de salud, la sostenibilidad de los suministros de radioisótopos, denominada asimismo “seguridad isotópica”, se ha convertido en un motivo principal de preocupación ante la disminución del número de reactores de investigación en explotación en todo el mundo. Se espera que en un futuro previsible el tecnecio 99m retenga su papel predominante en la formación de imágenes con rayos gamma. Como consecuencia de los adelantos en la esfera de la biología molecular se ha avivado el interés en la aplicación de radioisótopos para el tratamiento de enfermedades. El desarrollo de anticuerpos monoclonales humanos, péptidos y pequeños metabolitos moleculares, una mejor comprensión de la manera en que interactúan con las células y los avances registrados con respecto a los mecanismos de vinculación biológica y química han hecho realidad el concepto de una bala mágica. Ahora es posible tratar una forma aguda de leucemia mediante anticuerpos monoclonales marcados con radioisótopos (por ejemplo, ^{131}I , ^{213}Bi). Otro isótopo terapéutico importante con un número creciente de aplicaciones es el ^{90}Y . También se ha incrementado la demanda de otro isótopo, el ^{103}Pd , que actualmente se utiliza en el tratamiento del cáncer de próstata. El ^{188}Re se está convirtiendo también en un isótopo prometedor, pese a las dificultades que entraña su producción. Los radiofármacos basados en emisores alfa y beta permiten aplicar a los tejidos cancerosos dosis mucho más elevadas de las que se aplican con la teleterapia. En tanto que la terapia convencional de haces externos se ajusta a límites que apenas alcanzan unos 6 000 rad, mediante la terapia selectiva con radiofármacos se puede aplicar hasta un millón de rad, posibilidad que resulta fundamental para el tratamiento de ciertos tipos de cáncer, como el de páncreas. En el

ámbito médico están apareciendo una gran cantidad de nuevos radioisótopos emisores de rayos alfa y beta.

Cuadro I-2. Radioisótopos importantes, su fuente de producción y diferentes aplicaciones

	<i>Fuente</i>	
Aplicación	Reactor	Acelerador
Medicina		
1. Imaginología gamma	$^{99}\text{Tc}^m$, ^{131}I , ^{133}Xe	^{67}Ga , ^{111}In , $^{81}\text{Kr}^m$, ^{123}I , ^{201}Tl
2. Imaginología PET	^{18}F	^{18}F , ^{68}Ga , ^{124}I , ^{64}Cu , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O
3. Radioinmunoanálisis	^{125}I , ^3H	
4. Radiofármacos para terapia	^{131}I , ^{32}P , ^{90}Y , ^{169}Er , ^{153}Sm , $^{117}\text{Sn}^m$, ^{166}Ho , ^{186}Re , ^{188}Re	^{211}At
5. Teleterapia	^{60}Co	
6. Braquiterapia	^{192}Ir , ^{125}I , ^{137}Cs , ^{198}Au , ^{106}Ru	^{103}Pd
Industria		
1. Tratamiento por irradiación	^{60}Co	
2. Instrumentación nucleónica	^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{85}Kr , ^{147}Pm , ^{90}Sr , ^{204}Tl , ^{14}C , ^{252}Cf , ^{63}Ni , ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{210}Po	^{57}Co
3. Análisis no destructivos	^{192}Ir , ^{75}Se , ^{169}Yb	
4. Estudios con trazadores	^{47}Sc , $^{113}\text{In}^m$, ^{133}Xe	

I-3. INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR

La instrumentación nuclear conforma una esfera de gran innovación, lo que se traduce en la rápida disponibilidad de nuevos equipos, pero también en una tasa elevada de obsolescencia. Los adelantos permiten seguir mejorando la resolución energética, la eficiencia de detección, la tasa de recuento máxima detectable, la temperatura de trabajo, el rango de energía ampliada y la atenuación del ruido.

La situación prevaleciente actualmente en el mundo en el campo de los instrumentos nucleares se caracteriza por una consolidación empresarial de los principales fabricantes, que impulsa a muchas empresas a sumar sus esfuerzos a los de otras compañías con el fin de suministrar apoyo y servicios técnicos coordinados que se adapten mejor a las necesidades de los usuarios. Así, por ejemplo, una de las empresas más importantes del mundo en la rama de las tecno-

logías del ciclo del combustible nuclear se ha fusionado con otros destacados fabricantes de instrumentos de detección y análisis de las radiaciones, instrumentos de detección de las radiaciones y protección radiológica y sistemas de vigilancia radiológica de zonas para centrales nucleares y otras instalaciones.

En términos generales, se espera que con la aplicación de las nuevas tecnologías a los instrumentos nucleares se obtenga un menor consumo de energía, mayor fiabilidad, costos más bajos y mayor versatilidad, como también un mejor rendimiento. En el futuro, los instrumentos funcionarán de manera más automatizada e integrada, y se sustentarán más ampliamente en la tecnología digital de procesamiento de señales. Se prevé que, como resultado de una mayor integración de las placas de circuitos electrónicos, será necesario introducir cambios importantes en los programas de capacitación para técnicos e ingenieros electrónicos. El mantenimiento de los instrumentos nucleares será más fácil y la detección y reparación de fallos contará con un apoyo cada vez mayor de las modernas técnicas de comunicación, como el correo electrónico e Internet.

Cabe esperar que los actuales niveles elevados de innovación y competencia comercial en este campo continuarán por algún tiempo más, con el resultado de que habrá mayor especialización y un mayor número de adquisiciones y fusiones, que afectarán por igual a las empresas existentes y a las nuevas compañías que ofrezcan instrumentos nucleares. Se prevé asimismo que la competencia tecnológica y comercial en la esfera de los instrumentos nucleares, que tradicionalmente ha estado dominada por los países desarrollados, se abrirá a los países en desarrollo. En este grupo de países, los conocimientos especializados necesarios para dar mantenimiento y servicio a los instrumentos nucleares son actualmente un importante factor que determina el ritmo al que se asimilan las nuevas técnicas nucleares en general.

I-4. FUSIÓN NUCLEAR

Los desembolsos efectuados en todo el mundo en concepto de investigaciones en ciencia y tecnología relacionadas con la fusión nuclear ascienden aproximadamente a 1 500 millones de dólares anuales. El combustible más probable en una central comercial de fusión sería una mezcla 50-50 de deuterio y tritio, debido a que esta mezcla se fusiona a la temperatura más baja y produce el mayor rendimiento en materia de energía en comparación con otras reacciones de fusión. Otra ventaja es la abundancia de deuterio, en particular, que puede extraerse del agua de mar.

Con el fin de generar una reacción de fusión autosostenida en la cual la producción de energía sea varias veces mayor que el insumo de energía, los reactivos de fusión necesitan temperaturas del orden de 100 millones de grados Celsius, es decir, temperaturas más elevadas que las del interior del sol. Se denomina plasma al estado en que se encuentra la materia a esas temperaturas. Para el confinamiento del plasma se requieren técnicas especiales, puesto que ningún material de construcción puede resistir tales temperaturas. Existen tres métodos de confinamiento del plasma: 1) gravitacional (como ocurre con las estrellas, 2) magnético y 3) inercial. El método de confinamiento de plasma que ha resultado hasta ahora el más eficaz consiste en una botella magnética (tokamak) que mediante el empleo de fuertes campos magnéticos aplicados desde el exterior aísla el plasma caliente de forma toroidal de la estructura del reactor. Actualmente se encuentran en funcionamiento en diversos países unos 25 tokamak de investigación de tamaño grande (hasta de 10 MW) y mediano.

Gran parte de las investigaciones experimentales y teóricas en curso se centran en el reactor termonuclear experimental internacional (ITER), un proyecto internacional basado en el concepto de tokamak. El ITER tiene el propósito de demostrar la combustión de plasma y poner de manifiesto que la generación de electricidad por fusión nuclear puede ser segura y ambientalmente interesante, a pesar de que los niveles intensos de muy altos flujos neutrónicos de la fusión también pudieran llegar a aplicarse algún día para quemar - o transmutar - productos de fusión de período largo. Entre los resultados recientes del ITER se cuenta la conclusión de las actividades de diseño técnico (EDA) de un reactor de fusión. Esta labor fue realizada por el equipo central conjunto del ITER y por las partes en el ITER (Europa, el Japón, Rusia y, hasta 1999, los Estados Unidos), con los auspicios del OIEA. El diseño prevé la generación de 500 MW de energía de fusión por pulsación, que se estima que habrá de durar varios minutos [6]. Se espera que se obtendrá una relación insumo/producción de energía mayor de diez. Desde la puesta en marcha de las EDA en 1992, se han efectuado desembolsos por 830 millones de euros en concepto de investigación y desarrollo de tecnología para el ITER.

Han empezado a celebrarse conversaciones intergubernamentales con miras a la ejecución conjunta del proyecto ITER, que abarca decisiones sobre la repartición de los gastos y la selección del lugar. El Canadá ha ofrecido un emplazamiento cercano a la central nuclear de Darlington, en el lago Ontario, y se esperan otras propuestas sobre lugares en Cadarache, Francia, y en el Japón. Se prevé que el costo del ITER ascienda a unos 3 500 millones de dólares y es probable que la construcción comience ya en 2003 [7].

Se están realizando investigaciones sobre otros métodos de confinamiento de plasma, incluidos dispositivos de confinamiento magnético e inercial distintos del tokamak. Como ejemplo de un dispositivo de confinamiento magnético cabe citar un proyecto de estelarator, actualmente en construcción en Greifswald, Alemania, que tendrá un costo de 325 millones de euros. Se construyen asimismo grandes dispositivos de confinamiento inercial en Francia, el Japón y los Estados Unidos. Así, por ejemplo, en Livermore, California (Estados Unidos), está en construcción la National Ignition Facility, una instalación que contará con 192 haces de láser de 1,8 MJ.

PARTE II

ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA, CICLO DEL COMBUSTIBLE Y GESTIÓN DE DESECHOS

II-1. PANORÁMICA MUNDIAL DE LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA

II-1.1. Estudio nacional y regional

II-1.1.1. Estudio mundial

Al final de 2001 [8] funcionaban 438 centrales nucleares en todo el mundo, con una potencia total de 353 GW(e)¹. Entre ellas se contaban seis nuevas centrales conectadas por primera vez a la red en 2000 - una en el Brasil, una en la República Checa, tres en la India y una en el Pakistán - más dos nuevas centrales en 2001, una en el Japón y una en la Federación de Rusia. Tres se pusieron fuera de servicio en 2000 - Chernóbil-3 en Ucrania y dos unidades en Kinkley Point A, en el Reino Unido - pero ninguna en 2001. La participación de la energía nucleoelectrónica en la producción mundial de electricidad descendió ligeramente en 2000 a 15,9% de 16,1% en 1999 [9]. En términos de potencia, las centrales nucleares representaban el 10,2% de la potencia eléctrica mundial al final de 2001, es decir, un descenso marginal en relación con el 10,4% registrado al final de 1999. En 2000 comenzó la construcción de cinco nuevas centrales nucleares: una en China, dos en la India y dos en el Japón. En 2001 se comenzó a construir una central nuclear en el Japón. Al final de 2001 había en conjunto 32 centrales nucleares en construcción en el mundo. Las construcciones más recientes tienen lugar en Asia o en las economías en transición.

La tendencia más significativa de los últimos años han sido los constantes aumentos de los factores de disponibilidad de las centrales nucleares gracias a las mejoras registradas en los procedimientos operacionales, el apoyo técnico, la gestión estratégica, el suministro de combustible y la disposición final de combustible gastado, todos los cuales han reducido los costos y aumentado la seguridad. Estos factores han reducido los costos de generación y aumentado la seguridad. Su impacto acumulativo ha sido extraordinario: desde 1990 han incrementado los factores de disponibilidad en una cifra equivalente a la acumulación de 33 GW(e) de potencia adicional.

1 En el presente informe utilizamos la frase “central nuclear”, o CN, para hacer referencia a una sola unidad de reactor nuclear. A menos que se indique lo contrario, las cifras de potencia de las CN se refieren a la potencia *net*a eléctrica. Otras definiciones importantes utilizadas en el PRIS del OIEA son las siguientes: **Comienzo de la construcción:** Fecha de colocación del primer elemento importante de hormigón, por lo general la losa de cimentación del edificio del reactor. **Primera criticidad:** Fecha en que el reactor alcanza la criticidad por primera vez. **Conexión a la red:** Fecha en que la central se conecta por primera vez a la red eléctrica para suministrar energía. *Después de esta fecha, la central se considera en explotación.* **Explotación comercial:** Fecha en que los contratistas entregan la central al propietario y ésta se declara oficialmente en explotación comercial. **Parada:** Fecha en que el propietario declara oficialmente parada la central y fuera de explotación permanentemente.

Cuadro II-1. Reactores nucleares en explotación y en construcción en el mundo (información preliminar hasta enero de 2002)

PAÍS	Reactores en explotación (1 de enero de 2002)		Reactores en construcción (1 de enero de 2002)		Electricidad nuclear suministrada en 2001		Experiencia operacional total hasta el 31 de diciembre de 2001	
	Núm. de unidades	Total MX(e)	Núm. de unidades	Total MX(e)	TW(e)h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	19	21 283			162,30	30,52	610	1
ARGENTINA	2	935	1	692	6,54	8,19	46	7
ARMENIA	1	376			1,99	34,82	34	3
BÉLGICA	7	5 712			44,1	58,03	177	7
BRASIL	2	1 901			14,35	4,34	21	3
BULGARIA	6	3 538			18,24	41,55	119	2
CANADÁ	14	10 018			72,35	12,85	447	2
CHINA	3	2 167	8	6 426	16,68	1,14	26	5
ESLOVAQUIA	6	2 408	2	776	17,10	53,44	91	0
ESLOVENIA	1	676			5,03	38,98	20	3
ESPAÑA	9	7 524			61,07	26,87	201	2
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	97 860			768,83	20,35	2 663	8
FEDERACIÓN DE RUSIA	30	20 793	2	1 875	125,36	15,40	701	5
FINLANDIA	4	2 656			21,88	30,54	91	4
FRANCIA	59	63 073			401,30	77,07	1 228	2
HUNGRÍA	4	1 755			14,13	39,09	66	2
INDIA	14	2 503	2	980	17,32	3,72	195	5
IRÁN			2	2 111			0	0
JAPÓN	54	44 289	3	3 696	321,94	34,26	1 016	4
LITUANIA	2	2 370			11,36	77,58	32	6
MÉXICO	2	1 360			8,11*	3,66*	19	11
PAÍSES BAJOS	1	450			3,75	4,16	57	0
PAKISTÁN	2	425			1,98	2,86	31	10
REINO UNIDO	33	12 498			82,34	22,44	1 270	2
REPÚBLICA CHECA	5	2 560	1	912	14,75	19,76	63	9
REPÚBLICA DE COREA	16	12 990	4	3 820	112,13	39,32	185	2
RUMANIA	1	655	1	650	5,05	10,46	5	6
SUDÁFRICA	2	1 800			13,34*	6,65*	34	3
SUECIA	11	9 432			69,20	43,85	289	1
SUIZA	5	3 200			25,29	35,96	133	10
UCRANIA	13	11 207	4	3 800	71,67	46,36	253	10
Total	438	353 298	32	28 438	2 543,68		10 256	3

Nota: El total incluye los siguientes datos en Taiwan, China:

— 6 unidades, 4 884 MW(e) en explotación; 2 unidades, 2 700 MW(e) en construcción;

— 34,09 TW(e)h de generación de electricidad nuclear, que representaban 21,57% de la electricidad total generada;

— 122 años de experiencia operacional total.

Los valores con un asterisco constituyen estimaciones del OIEA.

† De las 22 unidades nucleares que hay en total en el Canadá, 14 están actualmente en explotación y ocho están fuera de servicio.

En el cuadro II-1 se resumen los datos hasta el inicio de 2002. En él se indica que la potencia nuclear se concentra en los países industrializados. La mayor participación de la energía nucleoelectrica en la generación de electricidad se observa en Lituania y Francia, con el 78% y el 77%, respectivamente. La experiencia operacional acumulativa al final de 2001 ascendía a más de 10 000 años-reactor.

II-1.1.2. Estudio regional y nacional del estado y las tendencias de la energía nucleoelectrica

En América del Norte, el futuro a corto plazo de la energía nucleoelectrica depende fundamentalmente de la economía. Las tendencias más importantes son la liberalización de los mercados de electricidad y, en consecuencia, la mejora del comportamiento de las centrales nucleares. La liberalización ha propiciado en gran medida la reducción de los costos de generación, el aumento de los factores de potencia, la consolidación, las adquisiciones, el aumento de la potencia total y las solicitudes de licencias más que las nuevas construcciones a medida que las empresas seleccionadas se van definiendo básicamente por la magnitud y pericia de sus operaciones nucleares. Por el momento, las continuas mejoras administrativas introducidas con el fin de aumentar la rentabilidad de las centrales nucleares existentes se consideran una estrategia más prometedora y menos arriesgada que el inicio de una nueva construcción.

En los Estados Unidos no se ha encargado ninguna nueva central nuclear desde 1978, aunque a partir de 1998 se han puesto nuevamente en marcha siete unidades que estuvieron fuera de servicio durante largo tiempo. No se está construyendo ninguna instalación nuclear. No obstante, el Nuclear Energy Institute (grupo de cabildo de la industria nuclear de los Estados Unidos) está propugnando el aumento de hasta 50 GW(e) de nueva potencia nuclear a más tardar en 2020, y la nueva política energética de los Estados Unidos que dio a conocer la Casa Blanca en mayo de 2001 recomienda el apoyo del Gobierno para “la expansión de la energía nuclear en los Estados Unidos como componente principal de nuestra política energética nacional”. En febrero de 2002 el Secretario de Energía de los Estados Unidos Spencer Abraham anunció “Energía nucleoelectrica 2010”, estrategia en la que el gobierno se compromete a trabajar con la industria para explorar emplazamientos y “apoyar el proceso destinado a recibir la aprobación de la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos para obtener el permiso inicial relativo al emplazamiento”, con el objetivo de lograr la puesta en funcionamiento de una nueva central nuclear en los Estados Unidos antes de finales de 2010.

En el Canadá, la expansión a corto plazo de la generación nuclear probablemente se produzca con la puesta en marcha de algunas de las ocho unidades nucleares (de un total de 22 que existen en el Canadá) que actualmente están abandonadas, o de todas. En febrero de 2001, la Canadian Nuclear Safety Commission finalizó una evaluación ambiental favorable para poner nuevamente en marcha cuatro unidades que se encuentran actualmente abandonadas en Pickering A. En mayo de 2001, Ontario Power Generation Inc. arrendó la central nuclear Bruce de ocho unidades a Bruce Power, empresa mixta de British Energy y Cameco. Cuatro de las unidades Bruce están funcionando actualmente, y cuatro están abandonadas. Bruce Power está evaluando la posibilidad de volver a poner en marcha dos de las unidades abandonadas. Con ello se conectarían a la red seis nuevas centrales nucleares, lo que representaría una potencia neta nuclear suplementaria de 3 598 MW(e) en todo el mundo.

Europa occidental tiene hoy día 150 reactores. Es probable que en los próximos años la potencia general se mantenga o se aproxime a los niveles existentes, incluso con la eliminación gradual de centrales nucleares que tendrá lugar por prescripción normativa sobre todo en Ale-

mania, Bélgica y Suecia. En Alemania, el acuerdo sobre la eliminación gradual de las centrales nucleares tendrá el efecto de reducir a 13 el número de reactores en explotación a más tardar al final de 2010, con lo que la potencia nuclear descenderá a 17,4 GW(e). En Suecia, una unidad se ha puesto fuera de servicio con carácter permanente. Barsebäck-2 es la segunda unidad que se proyecta poner fuera de servicio prematuramente. Se debía haber puesto en régimen de parada al final de 2001, pero ha habido un aplazamiento y no se ha fijado ninguna nueva fecha de parada definitiva.

La última nueva central nuclear que se conectó a la red en Europa occidental fue Civaux-2 en Francia en 1999, y no se está construyendo ninguna. Donde hay más posibilidades de aumento de la potencia nuclear es en Finlandia. En noviembre de 2000, la compañía eléctrica Teollisuuden Voima Oy (TVO) solicitó una decisión del Gobierno “en principio” para construir una quinta central nuclear en el país. En enero de 2002 el Gobierno adoptó una decisión favorable, que ratificó el Parlamento en mayo. La TVO tiene ahora un plazo de cinco años para solicitar un permiso de construcción.

En Europa occidental también la liberalización ha propiciado reducciones de costos y aumentos de la productividad. Muchos países ya han sobrecumplido los requisitos de la *Directiva 96/92/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de diciembre de 1996 relativa a las reglas comunes para el mercado interior de la electricidad*, lo que ha dado por resultado la apertura de dos tercios del mercado de electricidad (aunque todavía el comercio intracomunitario representa sólo el 8% de la producción total de electricidad) y el importante descenso de los precios para los consumidores industriales. Un efecto del descenso de los precios que ha propiciado la liberalización ha sido el cierre, o la propuesta de cierre, de instalaciones excedentes.

En Europa oriental hay 69 reactores que en total tienen una potencia instalada de 46 GW(e). Se están construyendo diez centrales nucleares. La Federación de Rusia fue el único país de la región que conectó una nueva central nuclear a la red en 2001: Rostov-1. Con ello el número total de centrales nucleares de la Federación de Rusia se elevó a 30 en diez emplazamientos, con una potencia total de 20,8 GW(e). En Kalinin y Kursk se están construyendo dos reactores, que representan una potencia adicional de 1,9 GW(e).

La Unión Europea mantiene su interés en cerrar los reactores WWER de primera generación refrigerados por agua y RBMK moderados por grafito en Europa oriental. La UE está presionando a Bulgaria, que ha convenido en cerrar Kozloduy-1 y -2 a más tardar en 2003, para que cierre también Kozloduy-3 y -4 a más tardar en 2006 en lugar de continuar los planes de modernización. Bulgaria ha recalado que las decisiones sobre las unidades Kozloduy -3 y -4 sólo se adoptarán después que se actualice la estrategia nacional de energía de Bulgaria más tarde en este año. Eslovaquia ha anunciado el cierre de las unidades Bohunice-1 y -2 en 2006 y 2008, respectivamente. Lituania ha acordado cerrar anticipadamente Ignalina-1 en 2005 y en junio de 2002 llegó a un acuerdo con la UE según el cual Lituania recibirá “financiación adecuada y suplementaria” de la UE para parar Ignalina-2 en 2009. Las negociaciones sobre los detalles, entre ellos la suma que aportará la UE, se programaron para principios de julio de 2002. Al mismo tiempo, varios países han ayudado a financiar mejoras de seguridad en otras centrales de Europa oriental con cargo a la Cuenta de Seguridad Nuclear, que administra el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo.

En el Lejano Oriente hay 79 centrales nucleares en explotación. Diecisiete se están construyendo y se prevén otras 19 por lo menos. La potencia y la producción son mayores en el Ja-

pón, que tiene 54 centrales nucleares con una potencia total de 44,3 GW(e). En la actualidad se construyen tres nuevas centrales, y se prevé comenzar la construcción de otras seis entre 2002 y 2011. Al igual que la República de Corea (que tiene 16 centrales nucleares en explotación y cuatro en construcción) los intereses del Japón en la energía nucleoelectrica, y la economía más competitiva de sus nuevas centrales se deben en parte a una relativa falta de recursos energéticos autóctonos y a las consiguientes preocupaciones acerca de la diversidad y seguridad del suministro. La energía nucleoelectrica también desempeña un importante papel en los planes que ha concebido el Japón para dar cumplimiento al compromiso del Protocolo de Kyoto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 6% en 2008-2012 con relación a 1990. En China funcionan tres centrales nucleares, que se conectaron a la red en los años noventa. Se están construyendo ocho más. Taiwan (China) tiene seis centrales nucleares y se están construyendo dos más.

La India tiene 14 centrales nucleares. Todas son relativamente pequeñas, y cada una tiene una potencia de 202 MW(e). El objetivo a largo plazo del país es tener 20 GW(e) de potencia (bruta) a más tardar antes de 2020. Con este fin, la India está desarrollando reactores reproductores rápidos para aprovechar sus amplias reservas autóctonas de torio. Además de las dos unidades de 490 MW(e) que se construyen en Tarapur, hay planes definidos de construir otros cuatro PHWR de 202 MW(e) en Kaiga, cuatro PHWR de 490 MW(e) en Rajasthan y dos WWER de 950 (MW(e) de diseño ruso en Kudankulam. En noviembre de 2001 se autorizaron las obras de excavación para las centrales de Kudankulam.

En la América Latina hay seis centrales nucleares en explotación, dos de cada una de ellas en la Argentina, el Brasil y México. En los documentos que han presentado los países al OIEA, sólo Atucha-2 de la Argentina figura actualmente "en construcción", aunque Angra-3 del Brasil está terminada al 59%. En diciembre de 2001 el Consejo Nacional de Energía del Brasil autorizó nuevos estudios, que se ultimarían en 2002, sobre la terminación de Angra-3.

El único país africano que tiene centrales nucleares en explotación es Sudáfrica. Eskom, que explota los dos PWR de 900 MW(e) de Koeberg, también dirige un consorcio internacional que desarrolla el PBMR. Suponiendo que se reciban en el plazo previsto las aprobaciones reglamentarias y legislativas necesarias, los trabajos iniciales de acondicionamiento del emplazamiento de un PBMR podrían comenzar en 2003 y la construcción efectiva en 2004. En el concepto del PBMR se incorporan varios reactores de pequeña potencia (~100 MW(e)) de diseño modular y construcción relativamente rápida, que pueden ampliarse para proveer centrales nucleares de distintos niveles de potencia, según se requiera. En la sección II-2.4 relativa a los diseños de reactores avanzados e innovadores se examina más a fondo el reactor PBMR.

II-1.2. Aceptación pública

Alemania, Bélgica y Suecia han adoptado políticas para la eliminación gradual de la energía nucleoelectrica. En Austria, Dinamarca, Grecia, Irlanda, Italia y Noruega está prohibida. Estas políticas denotan cuestiones de aceptación política y pública de la energía nucleoelectrica no aplicables a otras fuentes de energía, las que no afrontan restricciones categóricas comparables a las que estos países aplican a la energía nucleoelectrica. En esta sección se resumen cuestiones especiales relativas a la aceptación política y pública de la energía nucleoelectrica.

Las cuestiones en que se centra a menudo el debate son cuatro: la economía, la seguridad, los desechos y la proliferación. Las secciones II-2.3 y II-2.5 abordan las cuestiones de la eco-

nomía y los desechos, respectivamente. En esta sección se resumen los aspectos de la seguridad y la proliferación, así como también la forma en que las cuatro cuestiones se analizan de conjunto al elegir las distintas fuentes energéticas para lograr el equilibrio adecuado. También se incluye una breve sección sobre la seguridad nuclear en el contexto del terrorismo.

II-1.2.1. Intereses de seguridad

La información sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares se abordan en detalle en el *Examen de la seguridad nuclear* que publica anualmente el OIEA y no se repiten aquí. En esta sección se resumen brevemente los elementos clave relacionados con la aceptabilidad pública y política de la energía nucleoelectrónica.

Las evaluaciones comparativas de los riesgos para la salud y el medio ambiente de los distintos sistemas de generación de electricidad indican que la energía nucleoelectrónica y los sistemas de energía renovable se hallan en el nivel más bajo de la escala de riesgos. Los efectos importantes para la salud de la energía nucleoelectrónica se derivan únicamente de accidentes de envergadura, de los que ha habido uno: el accidente de Chernóbil de 1986. Sus causas fueron defectos graves de diseño unidos a errores graves del explotador. Desde que ocurrió el accidente la seguridad de las centrales nucleares ha aumentado considerablemente gracias al perfeccionamiento de la cultura de la seguridad nuclear y a la aplicación de tecnologías avanzadas para mejorar los elementos de seguridad relacionados con la ingeniería y el diseño. El historial de seguridad mundial de las centrales nucleares ha demostrado constantes mejoras y progresos notables en la modernización de los reactores de Europa central y oriental. También a partir del accidente de Chernóbil el amplio intercambio de información sobre la experiencia en materia de seguridad operacional se ha convertido en un factor determinante en las mejoras de seguridad nuclear a nivel mundial. Entre los mecanismos internacionales destinados a facilitar el intercambio se cuentan la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN) y el OIEA. La AMEIN fue creada a raíz del accidente de Chernóbil para fomentar el intercambio de información, la comparación, la emulación de las mejoras prácticas y la comunicación entre los miembros. Las actividades del OIEA comprenden misiones de examen y evaluación de la seguridad, el establecimiento de normas de seguridad internacionalmente reconocidas y actividades en apoyo de la Convención sobre Seguridad Nuclear.

La AMEIN supervisa el comportamiento del sistema de seguridad de las centrales nucleares y proporciona informes detallados directamente a sus miembros. Sus indicadores de comportamiento de la seguridad se definen teniendo en cuenta las diferencias entre los diseños de las centrales nucleares, por lo que no pueden resumirse en relación con todos los tipos de reactores ni se incluyen en sus publicaciones. Las figuras II-1 y II-2, empero, indican mejoras en dos indicadores de la AMEIN de acceso público relacionados con mejoras de seguridad: el número de paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad y las tasas de accidentes industriales en centrales nucleares.

La explotación satisfactoria e ininterrumpida de los reactores en todo el mundo demuestra la amplia aceptabilidad de sus actuales niveles de seguridad. Hoy el debate sobre la seguridad se desarrolla en gran medida en el contexto de los esfuerzos de la Unión Europea por acelerar el cierre de los reactores WWER de primera generación refrigerados por agua y los reactores RBMK moderados por grafito de Europa oriental. Al igual que sucede con otras tecnologías (empleadas, por ejemplo, en aeronaves, automóviles y edificios construidos en zonas sísmicas), las nuevas ideas y los adelantos técnicos entrañan siempre la posibilidad de aumentar la seguri-

dad. Así, aun cuando los niveles de seguridad de las centrales nucleares sean hoy ampliamente aceptables, la innovación y los adelantos de seguridad constantes seguirán siendo un objetivo fundamental de todos los diseños nuevos de reactores y ciclos del combustible examinados en la sección II-2.4.

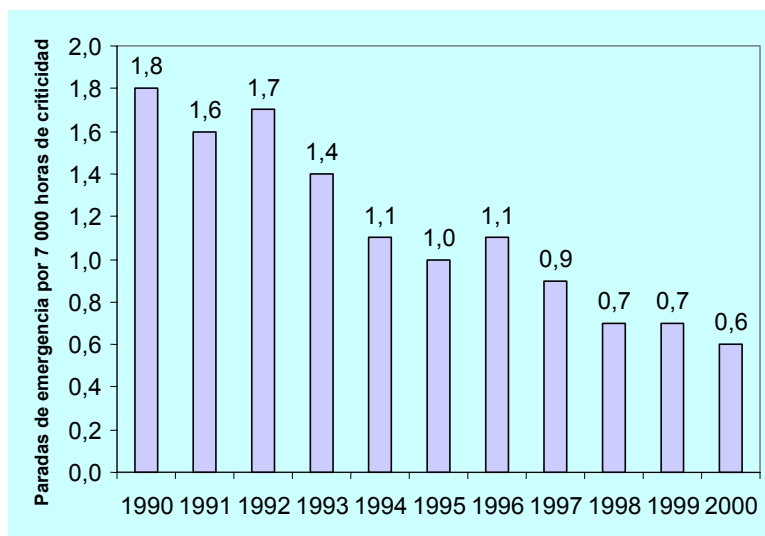


Figura II-1. Paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad

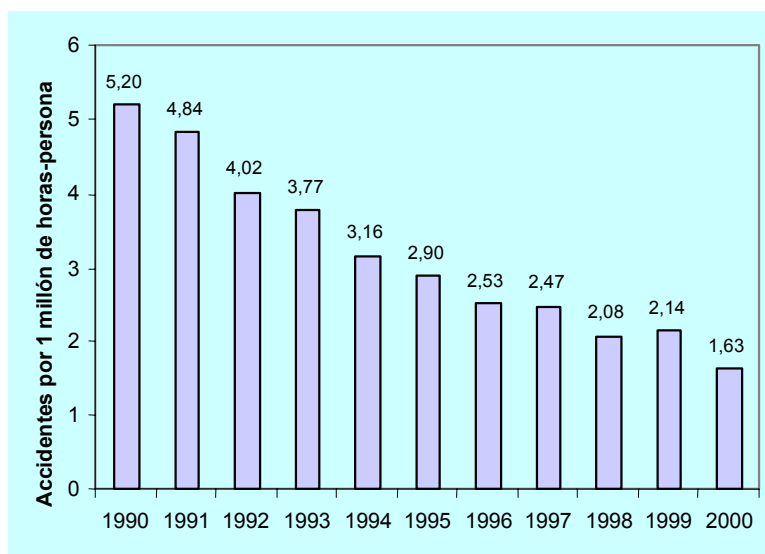


Figura II-2. Tasa de accidentes de seguridad industriales, número por 1 000 000 horas-persona trabajadas

II-1.2.2. Resistencia a la proliferación

El régimen internacional de no proliferación está constituido por el Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares y los acuerdos de salvaguardias amplias del OIEA, incluidos los protocolos adicionales que están en vigor en 24 países², las medidas internacionales de veri-

² Al 31 de diciembre de 2001.

ficación (el sistema de salvaguardias del OIEA y los acuerdos regionales y bilaterales) y los controles de las exportaciones.

En el *Informe sobre la aplicación de las salvaguardias* del Organismo para el año 2001. Se ha dado cuenta exhaustivamente de las actividades de salvaguardias del Organismo. Además de los importantes retos que plantea el fortalecimiento del sistema de salvaguardias, el desafío técnico será diseñar nuevas instalaciones nucleares con elementos más resistentes a la proliferación.

II-1.2.3. Seguridad

En respuesta a una petición que formuló la Conferencia General en su reunión de septiembre de 2001 (GC(45)/RES/14), el Director General presentó a la Junta de Gobernadores un informe titulado *Protección contra el terrorismo nuclear* en noviembre de 2001, y un informe revisado en marzo de 2002. La Junta aprobó en principio las actividades propuestas y las disposiciones de financiación, y destacó la urgencia de una financiación adecuada.

II-1.2.4. Evaluación comparativa

En los mercados idealizados, todos los costos asociados a una tecnología se internalizarían como parte de su costo económico, y en las decisiones basadas únicamente en los costos económicos quedarían debidamente recogidas en forma automática todas las consideraciones sociales. La energía nuclear supera con creces a otras tecnologías energéticas en lo que respecta a la internalización de sus costos externos. Los costos de la disposición final de desechos, la clausura y el cumplimiento de los requisitos de seguridad ya se incluyen en la mayoría de los países en el precio de la electricidad nuclear. Los progresos hechos en la búsqueda de reglas de juego uniformes en que los costos externos de otras tecnologías energéticas se internalizaran de manera más coherente como parte de sus costos económicos facilitarían la evaluación comparativa. Como indican los resultados de los estudios de ExternE en Europa [10], los costos externos de las centrales alimentadas con combustibles fósiles explotadas según las normas vigentes están muy por encima de los costos externos de las centrales nucleares, explotadas también conforme a las normas vigentes.

En 2001 se lograron progresos importantes, aunque todavía incompletos, en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, como se resume en la sección II-2.2. Esto y la seguridad del suministro energético³ recibieron mayor atención, entre otras deliberaciones normativas, en la nueva política energética de los Estados Unidos publicada en mayo de 2001, en el Libro Verde de la Unión Europea de noviembre de 2000 titulado *Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético* y en la resolución del Parlamento Europeo de noviembre de 2001.

3 La energía nuclear contribuye a la seguridad del suministro porque 1) el uranio se puede obtener de diversos países productores estables y 2) se requieren volúmenes reducidos, lo que facilita la tarea de determinar inventarios estratégicos.

II-2. EXAMEN DE LAS CUESTIONES FUNDAMENTALES

II-2.1. Aumento de la demanda de energía y electricidad

En todo el mundo se proyecta que el uso de la energía aumente notablemente durante todo el siglo XXI. Las fuerzas propulsoras son el crecimiento de la población y el desarrollo económico, sobre todo en los países en desarrollo. Las proyecciones generales más recientes fueron publicadas en 2000 en el *Informe especial sobre escenarios de emisiones* (IE-EE) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. En los 40 escenarios de referencia del IE-EE, el uso mundial de energía primaria aumenta por un factor de 1,7 a 3,7 hasta 2050, y en promedio por un factor de 2,5. La demanda de electricidad crece aun con mayor rapidez porque el crecimiento económico provoca constantemente la necesidad de recurrir a ella. Las personas prefieren su limpieza en el punto de uso final, su conveniencia y su flexibilidad. Según las proyecciones del IPCC, a más tardar en 2050 la electricidad crecerá por un factor de dos a ocho y en promedio aumentará por un factor de 4,7.

Deliberadamente ninguno de los 40 escenarios del IE-EE incluye políticas para mitigar el cambio climático. Sin embargo, en el *Tercer Informe de Evaluación* (TIE), se comunican los resultados de 76 escenarios de estabilización posteriores al IE-EE que sí incorporan esas políticas [11]. Como consecuencia de los límites impuestos a las emisiones de carbono en los escenarios del TIE, el uso de la energía no crece con tanta rapidez como en los escenarios del IE-EE, pero aun así aumenta considerablemente. Aunque los resultados de los 76 escenarios no están accesibles en general, Riahi y Roehrl [12] han analizado un subconjunto de 19 escenarios del TIE, que se incluye en el presente examen.

Cabe señalar que todos los escenarios del IE-EE y el TIE incluyen mejoras notables en la intensidad energética final⁴ de 1% a 2,5% anualmente. Los aumentos registrados durante el siglo XX promediaron un 1% anual, por lo que los escenarios suponen que se sigan explotando las posibilidades de nuevos aumentos de eficiencia generalmente a un ritmo cada vez más acelerado. El IE-EE avanza un paso más e incluye un conjunto de escenarios muy ecológicos, caracterizados por numerosas medidas de conservación, aumentos de la eficiencia y cambios de estilos de vida. Aunque la población y el uso de la energía crece en éstos con más lentitud que la media, incluso hasta el punto en que *disminuye* el uso absoluto de la energía en los países miembros de la OCDE, la utilización mundial de la energía sigue aumentando al menos hasta fines del siglo XXI. Incluso en los escenarios ecológicos en que la población mundial alcanza ya en 2050 una cifra máxima de sólo 8 600 000 habitantes, el crecimiento económico de los países en desarrollo se traduce aun en un crecimiento global de la energía a nivel mundial.

Las proyecciones de la potencia nuclear en los escenarios del IE-EE citados anteriormente se indican con barras verticales en la Fig. II-3. Las proyecciones para los 19 escenarios del TIE que analizan Riahi y Roehrl (que no aparecen en la figura) serían algo superiores. En los escenarios del IE-EE en 2050 la potencia nuclear proyectada oscila entre el valor actual de 350 GW(e) y más de 5 000 GW(e) (con un valor medio de más de 1 500 GW(e)). Ello exigiría la adición de 50 a 150 GW(e) anuales de 2020 a 2050. En los 19 escenarios del TIE, las proyecciones para 2050 oscilan entre 2 300 GW(e) de potencia nuclear y más de 7 000 GW(e) (con un valor medio

4 La intensidad energética final se define como la proporción de la suma de energía suministrada al usuario final respecto del producto interno bruto y sirve de dato indirecto en relación con las mejoras de eficiencia energética al nivel del uso final, el cambio económico estructural y el cambio de comportamiento.

de más de 4 400 GW(e)), para lo cual se tendrían que añadir 50 a 205 GW(e) anuales de 2020 a 2050, además de nuevas centrales que sustituyeran las antiguas que se pusieran fuera de servicio durante ese período.

En la Figura II-3 aparecen dos proyecciones a plazo intermedio claramente más bajas (hasta 2020) para la energía nucleoelectrica. Primero están las proyecciones del OIEA que indica el triángulo amarillo. En el límite inferior del triángulo está la proyección baja y en el superior, la proyección alta. Ambas proyecciones se basan en los exámenes anuales del OIEA sobre determinados proyectos y en los planes y proyecciones nacionales. En la proyección baja del OIEA (véase también el cuadro II-2) se supone básicamente que no habrá otras centrales nucleares más que las que ya se han construido o las que ya están planificadas en firme, que se pondrán fuera de servicio las centrales nucleares obsoletas y que a más tardar en 2020 habrá como resultado un descenso del 9% en la generación de electricidad nuclear. En la proyección alta del OIEA se calcula un incremento del 53% y aumentos de potencia sólo algo inferiores al valor medio del IE-EE. La última proyección de la Fig. II-3 es el caso de referencia del Organismo Internacional de Energía (OIE), que en la figura es imposible diferenciar de la proyección baja del OIEA (límite inferior del triángulo amarillo), aunque en ella sólo se prevé una reducción del 3% en la generación mundial de electricidad nuclear de 2000 a 2020, y no del 9%, como el OIEA.

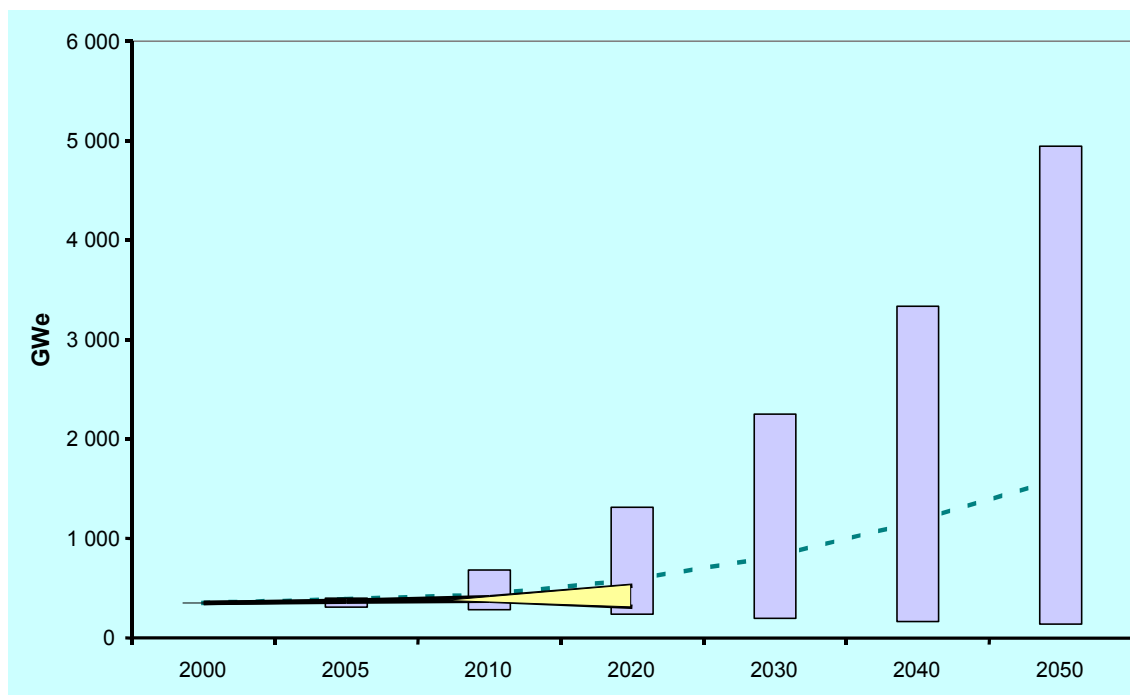


Figura II-3. Proyecciones de la potencia nuclear derivadas de tres series de escenarios. Las barras verticales muestran la escala proyectada en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE), y la línea punteada indica los valores medianos del IE-EE. El triángulo amarillo muestra el intervalo entre las proyecciones altas y bajas del OIEA hasta 2020.

La desigualdad de las proyecciones entre los escenarios a plazo intermedio del OIEA y el OIE y los escenarios a largo plazo del IE-EE y el TIE obedece en gran parte a las distintas hipótesis acerca de las restricciones políticas, los aumentos de costos y la innovación. La ausencia de nuevas centrales nucleares en Europa occidental y América del Norte que se observa en las proyecciones del OIE y en las proyecciones bajas del OIEA suponen entornos políticos hostiles o indiferentes, falta de innovación y progresos escasos o nulos en relación con los costos de las nuevas centrales. Por el contrario, los escenarios a largo plazo del IE-EE y el TIE suponen, primero, que las tecnologías nucleares, a diferencia de otras tecnologías, no son estáticas y, segundo, que a largo plazo las inversiones se hacen en última instancia en función de los aspectos económicos. En estos escenarios la industria nuclear efectúa constantes reducciones de costos, introduce innovaciones y puede vender centrales nucleares atendiendo exclusivamente a su costo y comportamiento en un mercado políticamente neutral. Varios de los escenarios del IE-EE y el TIE también suponen que una creciente proporción de la energía nuclear se utiliza para aplicaciones no eléctricas innovadoras, incluidos la producción de hidrógeno para el sector del transporte y usos estacionarios.

Cuadro II-2. Estimaciones de la generación total de electricidad y de la contribución de la energía nucleoelectrónica

Grupos de países	2000			2005			2010			2020			
	Elect. total TW.h	Nuclear		Elect. total TW.h	Nuclear		Elect. total TW.h	Nuclear		Elect. total TW.h	Nuclear		
		TW.h	%		TW.h	%		TW.h	%		TW.h	%	
América del Norte	4 586	822,6	17,9	4 951 5 097	832 838	17 16	5 349 5 660	809 842	15 15	6 004 6 690	659 978	11 15	
América Latina	1 029	19,7	1,9	1 138 1 245	25 25	2,2 2,0	1 273 1 556	27 43	2,1 2,7	1 623 2 434	28 79	1,8 3,3	
Europa occidental	2 937	842,7	28,7	3 147 3 249	820 838	26 26	3 377 3 594	796 844	24 23	3 901 4 377	596 991	15 23	
Europa oriental	1 716	274,3	16,0	1 803 1 900	295 308	16 16	1 897 2 115	311 342	16 16	2 231 2 868	210 417	9,4 15	
África	441	13,0	2,9	482 512	13 14	2,7 2,7	538 620	13 14	2,5 2,3	703 921	14 30	1,9 3,2	
Oriente Medio y Asia meridional	1 112	15,3	1,4	1 264 1 365	19 22	1,5 1,6	1 494 1 714	35 40	2,3 2,4	2 011 2 610	41 91	2,0 3,5	
Sudeste de Asia y el Pacífico	581			669 719			776 902			1 009 1 331			
Lejano Oriente	3 006	461,4	15,3	3 205 3 590	566 586	18 16	3 453 4 359	670 767	19 18	4 317 6 306	692 1 160	16 18	
Total mundial	Estimación baja	15 407	2 448,9	15,9	16 659	2 571	15	18 157	2 660	15	21 798	2 240	10
	Estimación alta				17 677	2 632	15	20 520	2 893	14	27 539	3 758	14

Para resolver la desigualdad de las proyecciones de la Fig. II-3 hay que lograr el éxito en dos frentes. Primero, mediante mejoras evolutivas e innovadoras, la industria nuclear debe reducir continuamente los costos. En la sección II-2.4 se analizan en más detalle las innovaciones y los progresos en relación con los nuevos diseños. Segundo, también hay que avanzar en las cuestiones de la aceptación política y pública, como se examina en la sección II-1.2. Nada de esto surgirá espontáneamente. Lo primero exigirá actividades de I+D innovadoras y sostenidas por parte de la industria y los gobiernos. Lo segundo exigirá un constante debate público y político acerca de los aspectos positivos y negativos de todas las opciones energéticas.

Recursos

Ninguna de las tres proyecciones que se analizan anteriormente, incluidas las proyecciones de 100 años del IE-EE y el TIE, sugiere que el futuro de la energía nucleoelectrica se verá limitado por una escasez de recursos nucleares económicamente asequibles, si bien se precisarán amplias actividades de investigación y desarrollo para garantizar que estos recursos sean realmente utilizables. Los escenarios a largo plazo del IE-EE y el TIE también suponen una innovación sostenida en los diseños de los reactores y ciclos del combustible nucleares para acrecentar constantemente el grado de aprovechamiento de los recursos nucleares. En general, en estos escenarios no se considera que el futuro de la energía nuclear se vea limitado inmediatamente por restricciones de recursos ni tampoco asegurado por una escasez de combustibles fósiles de precio asequible o por la imposición de estrictos límites en las emisiones de gases de efecto invernadero. En sentido más general, en el IE-EE y el TIE se llega a la conclusión de que es muy probable que el futuro energético del mundo no esté determinado por el agotamiento de una o más fuentes de energía.

Analizando a corto plazo la situación de los recursos nucleares, los precios del uranio descendieron constantemente desde mediados de 1996 hasta el final de 2000, y alcanzaron en el mercado al contado la cifra de 18,64 dólares/kgU (7,10 dólares/lb U₃O₈) hasta el 31 de diciembre de 2000. A partir de entonces los precios del mercado comenzaron a aumentar, como resultado de la consolidación de la industria y la reducción de la capacidad de producción, y el 5 de diciembre de 2001 se cifraron en 24,90 dólares/kgU (9,50 dólares/lb U₃O₈). Durante varios años la producción de uranio ha representado aproximadamente la mitad de su tasa de consumo, a lo que han contribuido en gran medida las fuentes secundarias de suministro, incluidos los inventarios de uranio, la conversión de materiales de armas nucleares en combustible de reactores comerciales, el reprocesamiento del combustible nuclear gastado y, en un grado muy limitado, el nuevo enriquecimiento del uranio empobrecido (colas). Las contribuciones sustanciales de las fuentes secundarias de suministro probablemente limiten la demanda de uranio recién producido a corto plazo, como resultado de la creciente disponibilidad de materiales procedentes del desmantelamiento de armas nucleares. Por lo tanto, en general se mantiene la expectativa de que probablemente sea modesta la presión ascendente de los precios del uranio en el futuro inmediato.

II-2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático

En abril de 2001, en el noveno período de sesiones de la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CDS-9), las partes acordaron no aceptar la contribución de la energía nuclear al desarrollo sostenible. En el texto final se señala que algunos países consideran la energía nuclear como un factor que contribuye notablemente al desarrollo sostenible, mientras que otros opinan que ambos son básicamente incompatibles. No obstante, las partes llegaron al acuerdo unánime de que “la decisión de optar por la energía nuclear es responsabilidad de los países”.

En noviembre de 2001 la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático llegó a un acuerdo en relación con las reglas de aplicación (mencionadas en los Acuerdos de Marrakech) del Protocolo de Kyoto. Éste es un paso muy importante para que se atribuya un valor económico real a la energía nucleoelectrica como factor susceptible de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente el hecho de que la energía nucleoelectrica no produzca prácticamente gases de efecto invernadero es una ventaja

de la que no se percatan los inversionistas. Salvo en casos contados, no se han impuesto restricciones ni tasas a las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que no existe ninguna presión económica para evitarlas. Particularmente en los mercados energéticos liberalizados, se hace preciso imponer restricciones obligatorias a las emisiones de gases de efecto invernadero para que la ventaja que reporta la energía nucleoelectrica al producir emisiones muy bajas importe alguna vez a los inversionistas. Por el momento, el Protocolo de Kyoto es la única solución funcional que existe en el mundo para lograr restricciones coordinadas y generalizadas de las emisiones de gases de efecto invernadero. Con todo, los Acuerdos de Marrakech excluyen los proyectos nucleares de dos de los tres mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto: el mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) y la aplicación conjunta (AC). La Secretaría del OIEA ha adoptado invariablemente la posición de que en las negociaciones sobre el cambio climático la energía nucleoelectrica debería juzgarse en virtud de su contribución a éste, y que la exclusión de cualquier tecnología claramente beneficiosa para el clima de cualquiera de los mecanismos flexibles sólo puede limitar las opciones, la flexibilidad y la eficacia en función de los costos. No obstante, los Acuerdos de Marrakech, incluso con la casi exclusión de la energía nuclear del MDL y la AC, son mejores para la energía nuclear que la inexistencia de un acuerdo.

Dos acontecimientos importantes de 2002 serán la prevista entrada en vigor del Protocolo de Kyoto y la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible que se celebrará en agosto a septiembre de 2002. Aunque los Estados Unidos no se han incorporado al proceso de Kyoto, un número suficiente de las partes en los Acuerdos de Marrakech manifestó que ratificaría ahora el Protocolo de Kyoto para alcanzar el umbral establecido para la puesta en vigor. La entrada en vigor exige la ratificación de al menos 55 partes, es decir, el 55% de las emisiones de carbono en 1990 del Anexo 1. Al 17 de junio de 2002 había 74 ratificaciones, que representan el 35,8% de las emisiones de carbono en 1990 del Anexo 1. La ratificación de la Federación de Rusia es necesaria (17,4% de las emisiones de carbono en 1990 del Anexo 1), tras lo cual Australia (2,1%), Canadá (3,3%) o Polonia (3,0%) podrían hacer que el total ascendiera a más del 55%. Éste es ahora el hito fundamental que acapara toda la atención. No obstante, casi todos partieron de Marrakech con el deseo de que se efectuaran mejoras en el acuerdo, y las negociaciones ulteriores podrían crear oportunidades para analizar nuevamente las exclusiones de la energía nuclear del MDL y el AC.

La Cumbre Mundial examinará los progresos realizados desde 1992 en la aplicación del Programa 21. La ciencia y la tecnología nucleares han tenido mucho que aportar a los progresos alcanzados con respecto al Programa 21 prácticamente en todas las esferas que abarca el presente *Examen de la tecnología nuclear 2002*. Como organismo especializado en la energía nuclear del sistema de las Naciones Unidas, el OIEA está contribuyendo actualmente a varios procesos preparatorios de las Naciones Unidas destinados a coordinar la información suministrada a la Cumbre Mundial sobre las contribuciones de las Naciones Unidas a los progresos logrados en el último decenio. En lo que concierne al OIEA, estos progresos incluyen el uso de las técnicas nucleares en los procedimientos médicos, la agricultura, la inocuidad de los alimentos, la salud pública, las técnicas industriales, los recursos hídricos y la generación de electricidad, así como las nuevas aplicaciones innovadoras, como por ejemplo, la detección de minas terrestres. Comprenden tanto la difusión y transferencia tecnológica de las aplicaciones establecidas actualmente como el apoyo para la ciencia nuclear y las investigaciones básicas en la búsqueda de nuevas aplicaciones innovadoras. El Organismo se propone tener una representación adecuada en Johannesburgo durante toda la Cumbre Mundial para que actúe como el principal recurso de información de las Naciones Unidas sobre el papel de todas las tecnologías nucleares en el desarrollo sostenible.

II-2.3. Competitividad económica

La mayoría de los mercados de electricidad del mundo están entrando en mayor competencia inducidos en parte por la tecnología, y en parte por la experiencia de que los mercados competitivos son más autosostenibles. Las compañías de electricidad están ahora negociando la venta de un producto básico (kWh) y de servicios comerciales más que de un producto estratégico. El aumento de la competencia ha impulsado generalmente la reducción de los costos de generación en comparación con estructuras de mercado más protegidas y monopolistas. La liberalización también ha propiciado la consolidación, las adquisiciones, los aumentos de potencia nominal y las solicitudes de licencias a medida que las empresas propenden a definirse en gran medida en función del volumen de sus operaciones nucleares y de su pericia.

II-2.3.1. Centrales existentes

Las centrales nucleares que funcionan actualmente con una administración eficiente por lo general han logrado buenos resultados en los mercados reestructurados. Los costos de explotación de las centrales, incluidos los costos de combustible, suelen ser más bajos que los de otras opciones, con excepción de la hidroelectricidad. El capital está depreciado en gran medida, y una central con costos de explotación y mantenimiento inferiores a los precios del mercado resulta rentable. Los costos de producción de la energía nuclear en los Estados Unidos descendieron a una media de 1,83 centavos/kWh en 1999 y a 1,74 centavos/kWh en 2000, y las más eficientes han tenido costos de explotación de aproximadamente 1,2 centavos/kWh. Los costos de generación de energía nuclear también descendieron en el Reino Unido de 1,99 peniques/kWh a 1,87 peniques/kWh en 2000. Para Electricité de France bajaron el 7% entre 1998 y 2000 y oscilaron entre 15 y 18 céntimos/kWh, según el emplazamiento. Los costos siguen tendiendo a la baja.

No todas las centrales nucleares se insertan en esta categoría. Aunque dos tercios de las centrales de los Estados Unidos producen energía por menos de 2 centavos/kWh, las demás tienen costos de 6 a 13 centavos/kWh. En el Reino Unido, cada una de las ocho centrales nucleares privatizadas de British Energy vende energía con ganancias a precios de mercado competitivos (un promedio de aproximadamente 3 centavos/kWh), mientras que las centrales Magnox asignadas a BNFL todavía están produciendo a 5 centavos/kWh aproximadamente, o se están cerrando por no ser económicas antes del final de su vida útil de diseño.

Durante el último decenio casi todas las centrales nucleares que ahora son competitivas lograron aumentos importantes, si no drásticos, en factores de disponibilidad y costos de explotación. La Figura II-4 muestra el aumento mundial del factor de disponibilidad de energía durante el último decenio. La disponibilidad de cada una de las centrales aumentó en muchos casos en unos 30 puntos porcentuales. La disponibilidad mundial de energía se elevó de 73% a más de 83% en 2001, es decir, el equivalente a la adición de 33 GW(e) de nueva potencia. En los Estados Unidos el factor de disponibilidad de energía aumentó constantemente de 80% en 1998 a 89,8% en 2001. Los factores medios de disponibilidad de energía en Alemania, España, Finlandia, Brasil, la República de Corea y los Países Bajos superaron el 90% en 2001.

Por todas estas razones (y dado el alto costo de las nuevas centrales que se examina a continuación), está creciendo el interés en la prolongación de la vida útil. Diez centrales de los Estados Unidos, por ejemplo, han recibido autorización para prolongaciones de la vida útil que

aumentan la vida útil de la licencia de cada una a 60 años. Otro 40% de las centrales estadounidenses en explotación han indicado la intención de solicitar prórrogas de licencia y la NRC espera que la cifra alcance a la larga el 85% o más. En 2001, el Ministerio de la Federación de Rusia para la Energía Atómica también decidió prolongar en 15 años la vida útil de Novovoronezh-3 y -4.

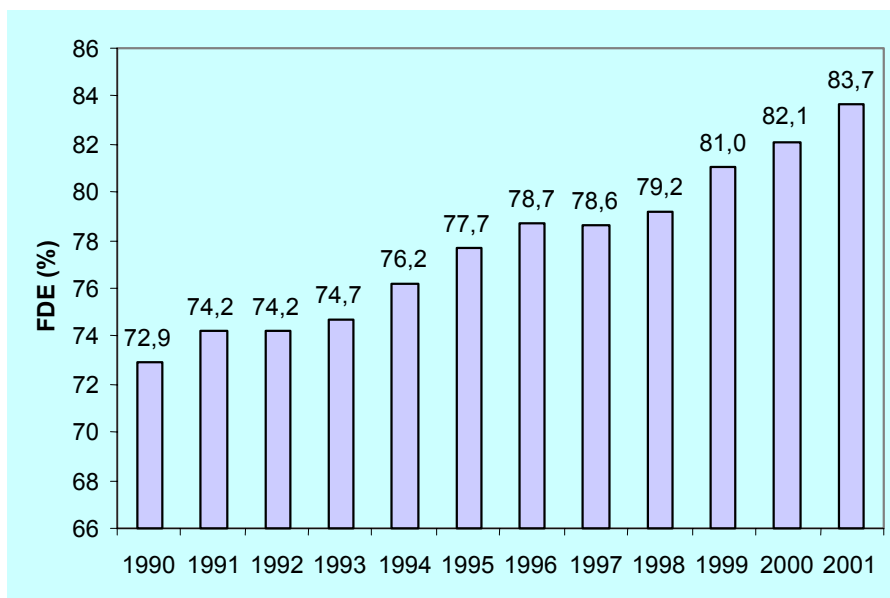


Figura II-4. Factor de disponibilidad media de energía a escala mundial (FDE)

Las solicitudes de aumento de la potencia están motivadas por muchos de los mismos factores. En 2001 los aumentos de potencia calculados en función de los datos del PRIS del OIEA totalizaron aproximadamente 740 MW(e), y el grueso de ellos se registró en América del Norte (unos 510 MW(e)) y Europa occidental (unos 180 MW(e)). La NRC de los Estados Unidos prevé que durante los próximos cinco años se hagan solicitudes por un aumento equivalente a 1 600 MW(e) de la potencia nominal.

II-2.3.2. Nuevas centrales nucleares

La gestión de los riesgos financieros asociados a los altos costos de capital, que representan un 70% de los costos totales de generación de energía nuclear, es un importante problema que hay que tener en cuenta en la financiación y construcción de las nuevas centrales nucleares. En el cuadro II-3 se comparan los costos de capital para distintas opciones sobre la base de los informes de la OCDE y el IPCC. Aunque según este cuadro la construcción de las nuevas centrales cuesta de ordinario dos a cuatro veces más que la de las centrales alimentadas con combustibles fósiles, es necesario tener presente dos aspectos. Primero, aunque los márgenes de los costos de capital y de generación de la energía nuclear consignados en el cuadro II-3 son en general mayores que en el caso de otras fuentes, hay suficiente solapamiento para que la opción de la energía nuclear sea a veces la preferida, sobre todo desde el punto de vista de los costos de generación. Segundo, la situación difiere en las distintas partes del mundo. Así, la energía nucleoelectrónica es más competitiva en el Japón y la República de Corea, en que los precios de los combustibles fósiles son altos y se otorga alta prioridad a la seguridad del suministro de energía. Este es un factor importante en la mayoría de las decisiones adoptadas recientemente con respecto

a la construcción de nuevas centrales nucleares (por ejemplo, en China, India, Japón y República de Corea), como lo fue antes en países como Alemania, Francia y Suecia. La energía nucleoelectrica también desempeña un papel importante en los planes del Japón para dar cumplimiento a su compromiso del Protocolo de Kyoto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además de los altos costos iniciales, las nuevas centrales entrañan riesgos de inversión que, aunque no son únicos del sector de la energía nuclear, son empero significativos. Hay riesgo de terminación (de que la central jamás se termine y nunca produzca ingresos para amortizar la inversión), riesgo reglamentario (de que los requisitos aprobados cambien a mitad del proceso) y riesgo político (de que cambien las políticas de los gobiernos que inciden en la rentabilidad o incluso en la conveniencia de la energía nucleoelectrica). Todos ellos pueden afectar a la credibilidad de un productor de energía y exigir un rendimiento de las inversiones que justifique los riesgos asociados a esos plazos de amortización más prolongados. Las reglas de inversión de la OCDE ya añaden una prima de riesgo del 1% a los tipos de interés de los préstamos fijados para todos los créditos de exportación que concede la OCDE a los países en desarrollo en relación con las centrales nucleares. Así, una incertidumbre importante en torno a la energía nuclear radica en conocer si los precios futuros del mercado permitirán a los propietarios de las centrales nucleares pagar esas primas y todavía ser rentables.

Los márgenes de costos de generación que se presentan en el cuadro II-3 están sujetos a distintos aspectos sensibles. Los altos costos de capital y los plazos prolongados hacen que los costos de la energía nucleoelectrica sean sumamente sensibles a los tipos de interés. Los costos de capital de las centrales alimentadas con carbón varían sobremanera con los mecanismos de reducción de la contaminación que se exigen. Los costos de generación de gas son muy sensibles a los precios del gas, que ya constituyen una proporción relativamente alta de los costos totales. Así pues, la inclusión de la energía nucleoelectrica en la mezcla energética puede ser una cobertura útil contra el precio de los combustibles y la inestabilidad de los tipos de cambio.

II-2.3.3. Perspectivas futuras

El futuro de la energía nucleoelectrica dependerá en gran medida del aumento constante de la competitividad económica de las nuevas centrales nucleares en el mercado mundial. Los objetivos de referencia se desplazarán constantemente a medida que las tecnologías competidoras mejoren sostenidamente su propio rendimiento y sus costos. El éxito de la energía nuclear dependerá en parte de los factores sobre los que tiene control la industria nuclear, y en parte de otros factores que escapan a éste. Entre estos últimos se cuentan los precios de los combustibles fósiles, la prioridad otorgada a la seguridad del suministro de energía, las restricciones de las emisiones de gases de efecto invernadero, el crecimiento de la demanda de energía, las incertidumbres reglamentarias y las innovaciones y la voluntad política para avanzar en la cuestión de la disposición final de desechos.

Los factores clave sobre los que la industria nuclear tiene gran control son la innovación, el control de los costos y la reducción de los riesgos comerciales, que suelen traducirse en plazos de construcción más cortos, costos de capital más bajos, y mayor seguridad y resistencia a la proliferación. En la próxima sección se describe la situación y las perspectivas de las actividades que se llevan a cabo actualmente.

Cuadro II-3. Costos de capital, costos de generación y plazos de construcción para distintas opciones de generación de electricidad. Basados en las Refs. [10] y [13].

	Costo por kW(e) instalado \$ EE.UU. ^{a)}	Costo total por 1 000 MW de potencia Miles de \$ EE.UU.	Período de construcción Años	Tamaño típico de la central MW	Costos típicos de central lista para funcionar Miles de millones de \$ EE.UU.	Costos indicativos de generación ^{b)} centavos/kWh
LWR nuclear	2 100 – 3 100	2,1 – 3,1	6 - 8	600 – 1 750	1,5 – 4,2	4,9 – 6,8
Mejor práctica nuclear	1 700 – 2 100	1,7 – 2,1	4 - 6	800 – 1 000	1,3 – 2,1	4,0 – 4,7
Carbón, pulverizado, PEE	1 000 – 1 300	1,0 – 1,3	3 – 5	400 – 1 000	0,5 – 1,3	3,2 – 4,5
Carbón, DGC, PEE, RCS	1 300 – 2 500	1,3 – 2,5	4 - 5	400 – 1 000	0,6 – 2,5	3,6 – 6,3
Gas natural TGCC	450 – 900	0,45 – 0,9	1,5 - 3	250 – 750	0,2 – 0,6	2,6 – 4,8
Central eólica	900 – 1 900	0,9 – 1,9	0,4	20 – 100	0,03 – 0,12	3,5 – 9,2

PEE = precipitador electrostático; DGC = desulfuración de gas de combustión; RCS = reducción catalítica selectiva; TGCC = turbina de gas de ciclo combinado; GJ = gigajulio.

a) Incluido el interés durante la construcción.

b) Basado en una tasa de descuento del 10%, un horizonte de planificación de 20 años y costos de combustible de \$ 1/GJ a \$ 2/GJ para el carbón y de \$ 1/GJ a \$ 5/GJ para el gas natural. Los costos de generación de energía eólica dependen de la velocidad media del viento y los factores de disponibilidad.

II-2.4. Diseños avanzados

En los mercados competitivos, las tecnologías se deben mejorar e innovar para no quedarse a la zaga. En esta sección se resumen las principales orientaciones actuales en los reactores de diseño avanzados⁵.

5 Un “diseño avanzado” es un diseño de interés actual para el que se esperan mejoras en relación con sus precedentes y/o los diseños existentes. Entre los diseños avanzados se cuentan tanto los evolutivos como los innovadores. En el diseño innovador se incorporan cambios conceptuales radicales en el enfoque del diseño o en la configuración del sistema. Probablemente se requieran actividades de I+D importantes, pruebas de viabilidad y una central prototipo o de demostración.

II-2.4.1. Reactores evolutivos refrigerados por agua

Reactores de agua ligera

En 1998, Framatome ANP en Francia y Alemania concluyó el diseño básico de un reactor europeo de agua a presión de 1 545 MW(e). La potencia relativamente alta fue elegida para conseguir economías de escala. Junto con sus asociados de Finlandia, los Países Bajos, Suiza y Francia, Framatome ANP de Alemania está elaborando el diseño básico del SWR-1000, BWR avanzado con características de seguridad pasiva.

En Suecia, Westinghouse Atom está construyendo el BWR 90+ de 1 500 MW(e), reactor de agua en ebullición avanzado con mayor seguridad y capacidad de funcionamiento.

El Japón está obteniendo los beneficios de la normalización y la construcción en serie en el caso de las unidades ABWR⁶. Se espera que los costos futuros de los ABWR descendan notablemente gracias a la normalización, los ajustes de diseño basados en la experiencia y la mejora de la gestión de los proyectos. En 1991 comenzaron las actividades de desarrollo del ABWR-II de 1 700 MW(e) para conseguir nuevas economías de escala. Se espera que el primer ABWR-II se ponga en servicio a fines del decenio de 2010. Mitsubishi Heavy Industries y Westinghouse han concluido el diseño básico de un PWR avanzado de 1 530 MW(e) para Tsuruga-3 y -4 de la Japan Atomic Power Company.

En la República de Corea, los beneficios de la normalización y la construcción en serie se están logrando con las centrales nucleares coreanas estándar (KSNP) de 1 000 MW(e)⁷. La Korea Electric Power Corporation (KEPCO) está construyendo la KSNP⁺ mejorada y, desde 1992, el Reactor Coreano de la Próxima Generación, denominado ahora Reactor de Potencia Avanzado 1400 (APR-1400). Se seleccionó la potencia de 1 400 MW(e) para conseguir economías de escala. En marzo de 2001, la KEPCO comenzó el proyecto de Shin-kori-3 y -4 para el APR-1400.

En mayo de 1997 se certificaron en los Estados Unidos los diseños de un PWR avanzado de gran potencia (el Combustion Engineering System 80+) y un BWR de gran potencia (el ABWR de General Electric). El diseño AP-600 de mediana potencia de Westinghouse con sistemas de seguridad pasiva fue certificado en diciembre de 1999. Westinghouse está construyendo actualmente una central de 1 090 MW(e), denominada la AP-1000, que utiliza tecnología de seguridad pasiva desarrollada para la AP-600 con el objetivo de conseguir nuevas economías de escala. General Electric está diseñando un BWR europeo simplificado de 1 380 MW(e) que aplica sistemas de economía de escala con sistemas modulares de seguridad pasiva. El diseño se basa en elementos tecnológicos del ABWR de General Electric y de su anterior BWR simplificado de 670 MW(e) con sistemas pasivos.

En la Federación de Rusia, prosiguen los esfuerzos en relación con las versiones evolutivas del actual WWER-1000 (V-320). Entre éstos se incluye el diseño del WWER-1000 (V-392), del que se prevén dos unidades en Novovoronezh, y las unidades WWER-1000 previstas en China,

6 Los primeros dos ABWR del Japón, Kashiwazaki Kariwa-6 y -7 de 1 360 MW(e), se han estado explotando a escala comercial desde 1996 y 1997 respectivamente. En Hamaoka-5 y Shika-2 se están construyendo centrales ABWR y en Ohma-1 se están realizando los trámites de obtención de la licencia. Otras ocho ABWR se encuentran en fase de planificación.

7 Las dos primeras KSNP, Ulchin-3 y -4, se mantienen en explotación comercial desde 1998 y 1999 respectivamente, y se están construyendo cuatro unidades más (Yonggwang-5 y -6 y Ulchin-5 y -6).

la India y la República Islámica del Irán. Se ha construido una unidad de mediana potencia WWER-640 con sistemas de seguridad pasiva, y han comenzado los trabajos de construcción de un WWER 1500 de alta potencia.

La China National Nuclear Corporation está construyendo la central CNP-1000. China aspira lograr la autosuficiencia tanto en el diseño de la central como en el fomento de la fabricación local del equipo con el fin de reducir los costos de construcción y explotación.

Reactores de agua pesada

En el Canadá, en el desarrollo de las centrales CANDU de la próxima generación (CANDU-PG) por la Atomic Energy of Canada Limited se mantienen las características y los niveles de potencia actuales del reactor CANDU evolutivo (por ejemplo, el CANDU-6 de 650 MW(e) y el CANDU-9 de 900 MW(e) con canales de combustible horizontales y recarga en servicio). Entre las nuevas características se cuentan un diseño de haz de combustible basado en uranio poco enriquecido y refrigerante de agua ligera.

En 2000, la India comenzó a construir dos unidades, cada una con una potencia neta de 490 MW(e), en Tarapur, basándose en la experiencia de las unidades de 202 MW(e) de diseño autóctono.

II-2.4.2. Reactores innovadores refrigerados por agua, por gas y por metal líquido

Los objetivos principales de muchos diseños innovadores son: breves plazos de construcción y puesta en marcha y bajos costos de capital. Varios diseños innovadores son de pequeña a mediana potencia y se construirían con estructuras y componentes fabricados en la planta, incluidas unidades modulares completas para una rápida instalación en el emplazamiento. Los reactores de pequeña a mediana potencia también podrían beneficiarse de las economías de producción en serie, a diferencia de los diseños de mayor potencia concebidos para las economías de escala. Asimismo, podrían ser más fáciles de financiar y de interés para los países con modestas redes de electricidad o para los lugares remotos. Por último, podrían ser más apropiados para aplicaciones no eléctricas tales como la calefacción urbana, la desalación, la producción de hidrógeno y la producción de petróleo a partir de arenas alquitranadas y combustibles pesados.

Reactores refrigerados por agua

La tendencia de los diseños de reactores de agua ligera de pequeña a mediana potencia ha sido hacia la prolongación de la vida útil del núcleo y el diseño modular para la producción en la planta de componentes y sistemas normalizados. En el caso de varios diseños “integrales” de PWR se ha eliminado la tubería del sistema primario, instalándose el generador de vapor en la misma vasija que el núcleo del reactor. Un grupo internacional liderado por la Westinghouse viene desarrollando el diseño integral IRIS modular (100 a 300 MW(e)) que tiene una vida útil de recarga del núcleo de ocho años y sólo requiere mantenimiento una vez cada cuatro años. El reactor argentino CAREM (diseño prototipo de 27 MW(e)) se refrigera por circulación natural y tiene sistemas de seguridad pasiva. El diseño SMART de 330 MW(t), de la República de Corea, es un PWR integral y, al igual que el CAREM, no utiliza boro soluble. El paso siguiente es la construcción de una planta piloto SMART de 65 MW(t).

El Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica está desarrollando una ampliación del diseño del reactor MRX para buques, que es un diseño integral de hasta 300 MW(e). La compañía Toshiba y el Instituto de Tecnología de Tokio están desarrollando un BWR simplificado con un ciclo de funcionamiento prolongado, refrigerado por circulación natural y con sistemas de seguridad pasiva. Se trata de un diseño de 100 a 300 MW(e). Su objetivo es lograr que el núcleo tenga una vida útil de 15 años.

Rusia ha desarrollado un diseño de PWR integral de 600 MW(e) y varios diseños de reactores de pequeña potencia, incluidos un PWR de circuito cerrado montado en una plataforma flotante, el KLT-40C de 35 MW(e); un PWR tipo piscina, el RUTA-55; un PWR de 15 MW(t) con una vida útil única del núcleo de 20 años, el UNITHERM; un PWR integral de 6MW(e) basado en tecnologías marinas, el ABV-6; y el BWR VK-300, desarrollado a partir del aumento de la potencia del VK-50.

En China, el Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear, cerca de Beijing, ha desarrollado un PWR integral de 200 MW(t), denominado el NHR-200, para fines de desalación y calefacción urbana.

En Europa, siete asociados vienen evaluando la viabilidad de un LWR de alto rendimiento y de funcionamiento termodinámico en régimen supercrítico. En el Japón y los Estados Unidos también se está trabajando en conceptos termodinámicamente supercríticos. Se prevé que con los diseños simplificados se podrá obtener un aumento del rendimiento térmico del 40% al 45%.

Asimismo, la AECL está desarrollando en el Canadá un diseño innovador, el CANDU-X, que utilizaría refrigerante para régimen supercrítico a fin de lograr un alto rendimiento termodinámico.

La India está desarrollando el Reactor Avanzado de Agua Pesada, que es un reactor de 235 MW(e) de tubo vertical a presión, refrigerado por agua ligera en ebullición y moderado por agua pesada, con características de seguridad pasiva y optimizado para utilizar combustible de torio para la producción de electricidad. Los estudios del diseño conceptual y la viabilidad del diseño ya se han concluido. El reactor se encuentra actualmente en la etapa de diseño detallado.

Reactores refrigerados por gas

Los reactores modulares de alta temperatura refrigerados por gas que utilizan combustible de partículas revestidas y con características de seguridad inherente y sistemas pasivos, junto con la tecnología avanzada para la conversión de la potencia, han despertado un renovado interés. Estos reactores pueden utilizarse para la generación de electricidad con mayor grado de eficiencia, la cogeneración de electricidad y calor y las aplicaciones a alta temperatura. Los diseños aprovechan la alta capacidad térmica, los coeficientes de temperatura negativa de la reactividad y la alta retención de los productos de fisión dentro de las partículas de combustible revestidas en condiciones de accidente. En ellos se incorporan sistemas pasivos para la eliminación del calor de desintegración sobre la base de la convección natural y la radiación térmica.

En China, el reactor de alta temperatura de lecho de bolas de 10 MW(t) (HTR-10), en la Universidad Tsinghua, alcanzó la criticidad en diciembre de 2000. Este reactor se utilizará para adquirir experiencia y realizar ensayos experimentales y de demostración de la seguridad. Aunque el reactor funcionará inicialmente con una turbina de vapor, se tiene previsto convertirlo ul-

teriormente para que funcione con una turbina de gas. Actualmente se están realizando, conjuntamente con el OIEA, experimentos de referencia en física de reactores.

En el Japón se siguió aumentando durante 2001 la potencia del Reactor de Ensayo Técnico de Alta Temperatura de 30 MW(t) hasta alcanzar 20 MW(t) en febrero y plena potencia (30 MW(t)) en diciembre. Actualmente se están realizando, conjuntamente con el OIEA, experimentos de referencia en física de reactores e hidráulica térmica. Se está desarrollando un diseño de turbina de gas de 600 MW(t) para la producción de electricidad.

El Ministerio de Energía Atómica de la Federación de Rusia y el Departamento de Energía de los Estados Unidos están diseñando un reactor modular de turbina de gas refrigerado por helio (GT-MHR). El proyecto de diseño fue preparado en diciembre de 2001. Este tipo de diseño se considera como una posibilidad para utilizar el plutonio apto para fabricar armas en la producción de electricidad y calor, con el aumento inherente de seguridad y eficiencia económica. Se prevé construir un GT-MHR de 300 MW(e) y una instalación de fabricación de combustible de plutonio en el emplazamiento de un complejo químico de Siberia, en Seversk, a más tardar en 2010. En los Estados Unidos, se estableció una junta consultiva de compañías de electricidad, incluidas las compañías que representan el 35% de la producción de electricidad nuclear de los Estados Unidos, para ayudar a promover el proyecto GT-MHR. Participan también la Tepco del Japón y la Empresa estatal rusa para la producción de energía eléctrica y térmica en las centrales nucleares (Rosenergoatom).

Eskom, la compañía sudafricana de desarrollo industrial, y la BNFL (Reino Unido) están desarrollando conjuntamente un reactor modular de lecho de bolas y turbina de gas de ciclo directo (PBMR) para la generación de electricidad con miras a obtener mayor grado de eficiencia y la consecución de un elevado nivel de seguridad mediante características inherentes y sistemas de seguridad pasiva. A fines de 2001 el diseño del PBMR se encontraba en la etapa de detalle técnico que precede a la conclusión del diseño final, y los inversionistas han indicado que esperan tomar una decisión a fines de 2002 sobre la construcción de una planta de demostración en Sudáfrica.

Reactores refrigerados por metal líquido

Vista la creciente disponibilidad de uranio de bajo costo, entre los objetivos del desarrollo de reactores refrigerados por metal líquido figuran ahora la incineración de las existencias de plutonio y el fraccionamiento y la transmutación. En varios países se realizan investigaciones sobre los reactores rápidos (China, Francia, India, Japón y República de Corea) y sistemas híbridos como los sistemas accionados por aceleradores y los sistemas híbridos de fusión/fisión (China, India, Japón, República de Corea, Unión Europea, Belarús, Federación de Rusia y Estados Unidos). Las ventajas potenciales de los sistemas accionados por aceleradores (SAA) son: bajo coeficiente de producción de desechos, gran capacidad de transmutación, características de seguridad mejoradas y mejor aprovechamiento a largo plazo de los recursos (por ejemplo, con combustibles de torio). Las metas comunes de los actuales programas de I+D son la reducción de los costos, el aumento de la eficiencia, la mejora de la seguridad y resistencia a la proliferación y la simplificación del ciclo del combustible nuclear.

En China, el reactor rápido experimental chino de 25 MW(e) se encuentra en construcción. La criticidad inicial está prevista para fines de 2005.

El Japón considera que el prototipo de reactor reproductor rápido MONJU es la piedra angular de las actividades de I+D y viene realizando grandes esfuerzos por ponerlo nuevamente en funcionamiento. En el marco del estudio de viabilidad de un sistema comercializado del ciclo de los reactores reproductores rápidos que realiza actualmente el Instituto de Desarrollo del Ciclo del Combustible Nuclear del Japón se examinan los tipos de reactores, las tecnologías de fabricación de combustible y los métodos de reprocesamiento del combustible gastado con el objeto de llegar a una tecnología del ciclo de los reactores reproductores rápidos competitiva desde el punto de vista de los costos y a un amplio programa de I+D.

La República de Corea está desarrollando el reactor rápido KALIMER y el proyecto sobre sistemas accionados por acelerador HYPER (Reactor híbrido de extracción de potencia). El diseño conceptual y el diseño básico del KALIMER se finalizarán en 2002 y 2006, respectivamente. La primera fase del proyecto HYPER quedó concluida en 2000; se prevé un examen por homólogos del proyecto en 2003 y estudios iniciales de irradiación del combustible aproximadamente en 2005.

La India está realizando el diseño detallado, las actividades de I+D, la labor de desarrollo de la tecnología de fabricación y el examen de la seguridad con respecto a un prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e); las actividades a este respecto se centran en la física de los reactores, el desarrollo tecnológico, la tecnología de la seguridad, la mecánica estructural, la termohidráulica, la metalurgia, la evaluación no destructiva, la química y el reprocesamiento.

El Commissariat à l'énergie atomique de Francia ha iniciado un programa de I+D para estudiar tecnologías prometedoras, utilizando como concepto de referencia un reactor rápido refrigerado por gas con un ciclo del combustible cerrado en el emplazamiento. En el Reino Unido, la BNFL está examinando el diseño del núcleo, el diseño termohidráulico y el diseño del combustible en relación con los reactores rápidos refrigerados por gas y con los sistemas accionados por acelerador. La Organización Europea de Investigaciones Nucleares y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea vienen apoyando estudios de SAA en ocho países.

A más tardar en 2010, Rusia prevé finalizar la obra de construcción del reactor rápido BN-800 en el emplazamiento de la central nuclear de Beloyarsky. Además de los trabajos destinados a justificar la prolongación de la vida útil de los reactores BR-10, BOR-60 y BN-600 y de los estudios sobre el diseño del núcleo híbrido del BN-600, las actividades de I+D relacionadas con los reactores rápidos de Rusia se centran en conceptos avanzados con características de seguridad mejoradas. Entre esas actividades figuran las relativas a un reactor rápido refrigerado por sodio de gran potencia (~1 600 a 1 800 MW(e)) y diseños con otros refrigerantes: plomo o plomo-bismuto. Se está desarrollando una nueva tecnología, conocida como BREST, basada en los reactores rápidos y en un ciclo del combustible destinado a reducir los desechos y a ser inherentemente seguro en los confines del emplazamiento, económicamente competitivo y resistente a la proliferación. La BREST, que lleva en proceso de desarrollo más de un decenio, emplea un combustible de nitrato de plutonio y un refrigerante de metal líquido pesado (plomo). Hasta la fecha, el diseño técnico del reactor BREST-OD-300 se ha elaborado, junto con un programa de I+D, para corroborar el diseño técnico que incorpora un ciclo del combustible en el emplazamiento. También se están investigando diseños modulares de centrales nucleares (SVBR-75/100) basados en reactores rápidos refrigerados por eutéctico de plomo-bismuto (tecnología de refrigerante que desarrolló inicialmente Rusia para los submarinos nucleares). Las

centrales nucleares con reactores SVBR-75/100 podrían utilizarse para la producción de electricidad, la calefacción, la desalación o la utilización y transmutación de actínidos.

Las actividades de Rusia relacionadas con los SAA incluyen estudios de diseño e investigaciones sobre procesos físicos básicos.

Entre los programas sobre reactores rápidos y SAA de los Estados Unidos figuran el programa de tratamiento electrometalúrgico del reactor reproductor experimental EBR-II, la Iniciativa de investigación de energía nuclear (NERI) y el Programa de aplicaciones de aceleradores avanzados (Programa AAA). En el marco del programa de tratamiento electrometalúrgico del EBR-II se están procesando actualmente unas 25 toneladas de combustible gastado del EBR-II y se tiene previsto realizar ulteriormente actividades de I+D encaminadas a la mejora de las tasas de procesamiento y la cualificación de los desechos para su aceptación en los repositorios. En el marco de la NERI se está desarrollando un diseño modular de 50 MW(e) con refrigerante de plomo-bismuto, denominado "Reactor encapsulado de fuente de calor nuclear", con una vida útil del núcleo de 15 años. El Programa AAA abarca un plan de actividades de I+D, de 10 años de duración, destinado a la definición de tecnologías clave para transmutar desechos nucleares (plutonio, actínidos de menor importancia y productos de fisión de período largo) y construir una instalación de ensayo accionada por acelerador. Esta instalación servirá de estación principal de ensayo para la verificación de las pruebas de comportamiento, la demostración de la seguridad y el funcionamiento de los sistemas accionados por acelerador, y la transmutación y el reciclado eficaces de los actínidos de menor importancia y los productos de fisión de período largo.

Proyectos internacionales sobre reactores y ciclos del combustible innovadores

Existen dos proyectos internacionales importantes sobre diseños de reactores innovadores. El Foro Internacional de la Generación IV (GIF), fue iniciado por los Estados Unidos de América en 2000. Sus miembros son: Argentina, Brasil, Canadá, Estados Unidos de América, Francia, Japón, Reino Unido, República de Corea y Sudáfrica. El OIEA y la AEN/OCDE participan como observadores permanentes en el Grupo de Políticas del GIF, que rige el marco conceptual y las políticas generales del proyecto. El objetivo del GIF es determinar, evaluar y desarrollar tecnologías nucleares sostenibles que puedan autorizarse, construirse y explotarse para el suministro de energía a precios competitivos y que solucionen al mismo tiempo de manera satisfactoria las cuestiones relacionadas con la seguridad nuclear, los desechos, la resistencia a la proliferación y las preocupaciones de la opinión pública en los países en los que se utilicen. El primer paso consiste en elaborar un plan de desarrollo de tecnologías como orientación para las actividades de investigación y desarrollo. En el marco de ese plan se evaluarán todos los conceptos razonables, incluidos los sistemas nucleares para aplicaciones no eléctricas. El producto final será uno o más sistemas nucleares de la próxima generación que se diseñarán y utilizarán en la mayoría de los mercados mundiales antes de 2030.

El Proyecto internacional del OIEA sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) se basa en una resolución de la Conferencia General del Organismo de septiembre de 2000, por la que se invita a todos los Estados Miembros interesados, incluidos tanto los suministradores como los usuarios de la tecnología, a considerar de manera conjunta las medidas internacionales y nacionales necesarias para realizar las innovaciones deseadas en los reactores y ciclos del combustible nucleares. En una resolución ulterior, aprobada en la reunión de la Conferencia General de 2001, los Estados Miembros encomiaron los progresos iniciales del INPRO y reiteraron su firme apoyo al proyecto. También se expresó apoyo a ese proyecto en la

resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas sobre el Informe del OIEA (A/RES/56/94), aprobada el 14 de diciembre de 2001, en la que se subrayó “el papel único que puede desempeñar el Organismo en la determinación de los requerimientos de los usuarios y en la labor sobre las cuestiones relativas a las salvaguardias, la seguridad y el medio ambiente relacionadas con los reactores innovadores y sus ciclos del combustible” y se recalcó “la necesidad de lograr la cooperación internacional en el desarrollo de tecnología nuclear innovadora”.

El INPRO es un proyecto en el que participan todos los departamentos pertinentes del Organismo. Actualmente cuenta con 13 miembros (Alemania, Argentina, Brasil, Canadá, China, España, Federación de Rusia, India, Países Bajos, República de Corea, Suiza, Turquía y la Comisión Europea). Los países participantes han puesto a disposición del proyecto 17 expertos a título gratuito.

El mandato del INPRO se estableció en una reunión de funcionarios superiores de 25 Estados Miembros y organizaciones internacionales celebrada en noviembre de 2000. Se estableció un comité de dirección, compuesto de miembros (participantes de los países que proporcionan recursos extrapresupuestarios) y observadores de los Estados Miembros y organizaciones internacionales interesados, para que proporcionara orientación general, asesorara sobre la planificación y los métodos de trabajo y examinara los resultados alcanzados. El Comité de Dirección se reunió por primera vez en mayo de 2001 para examinar y aprobar la estructura orgánica del proyecto, el esquema del informe propuesto, los recursos, el programa general y el contenido del plan de trabajo y de las tareas. En la segunda y tercera reuniones del Comité de Dirección, celebradas en diciembre de 2001 y mayo de 2002, se examinaron los primeros informes de situación y se aprobó el desarrollo continuo del proyecto. Asistieron a ellas observadores de 12 países: Australia, Belarús, Bélgica, Chile, Croacia, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón, Reino Unido, República Checa, y Sudáfrica y de cuatro organizaciones internacionales: el Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas, el Centro Internacional de Ciencia y Tecnología, el Organismo Internacional de Energía y la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE. Las reuniones se centraron igualmente en los mecanismos y criterios para fomentar las aportaciones científicas directas al proyecto de los países y organizaciones que participan en calidad de observadores y en los preparativos para el informe de la Fase 1A.

Los objetivos generales del proyecto son asegurar la disponibilidad de la energía nuclear para ayudar a satisfacer las necesidades energéticas del siglo XXI y contribuir al desarrollo sostenible; involucrar tanto a los suministradores como a los usuarios de la tecnología; y promover las innovaciones en los reactores y ciclos del combustible nucleares que permitan atender a las posibles necesidades futuras desde el punto de vista económico, de la seguridad, los efectos ambientales, la resistencia a la proliferación y la aceptación pública. Las actividades se centran actualmente (Fase 1A) en definir los “requisitos de los usuarios” sobre los que puedan basarse ulteriormente el proyecto u otros para ayudar a diseñar las estrategias de I+D encaminadas a satisfacer las necesidades previstas para mediados del siglo. El INPRO está elaborando actualmente los requisitos de los usuarios en cinco esferas: economía y recursos, seguridad, efectos ambientales, resistencia a la proliferación y cuestiones comunes, que abarcan los requisitos infraestructurales, industriales, jurídicos e institucionales, y las repercusiones en la enseñanza, la capacitación y las actividades de I+D, así como en el orden sociopolítico. En el marco de una sexta tarea se elaborarán métodos y criterios de evaluación para aplicar estos requisitos de los usuarios a determinados diseños nucleares innovadores. Se prevé que la Fase 1A se finalizará en 2002, y en ese momento se iniciará la Fase 1B, en la que los Estados Miembros examinarán los diseños innovadores en función de los criterios y requisitos establecidos en la Fase 1A.

II-2.5. Combustible gastado y desechos radiactivos

II-2.5.1. Combustible gastado

Durante décadas, el combustible gastado se ha venido almacenando de manera segura en reactores e instalaciones de almacenamiento provisional. La instalación de almacenamiento provisional inaugurada en fecha más reciente es la de Zwiilag, en Suiza, que recibió su primera expedición en julio de 2001. Con una modesta ampliación de su capacidad de almacenamiento, estas instalaciones de almacenamiento provisional y en el emplazamiento podrían satisfacer las necesidades a este respecto durante muchos años, lo que permitiría disponer de suficiente tiempo para la búsqueda minuciosa de una solución a largo plazo que sea más aceptable para el público. En estos momentos existe una constante necesidad de una nueva capacidad de almacenamiento del combustible gastado fuera de los emplazamientos de los reactores. Con el fin de reducir los costos del ciclo del combustible y las cantidades de combustible gastado, un mayor número de compañías eléctricas vienen utilizando combustible de más alto grado de enriquecimiento, lo que permite obtener un mayor grado de quemado y lotes de recarga más pequeños. Aunque de esta manera se logra reducir la cantidad de combustible gastado, el mayor grado de quemado del combustible exige períodos de almacenamiento más prolongados antes de su disposición final. La estrategia adoptada por muchos países de dar un “compás de espera” a la cuestión del almacenamiento del combustible gastado también supone períodos de almacenamiento más prolongados e ilimitados. Por lo tanto, será necesario prolongar la vida útil de las instalaciones de almacenamiento existentes y construir nuevas instalaciones para el almacenamiento a largo plazo.

Aunque la experiencia ha demostrado que las tecnologías de almacenamiento de combustible gastado actualmente existentes proporcionan protección adecuada desde el punto de vista de la salud pública y del medio ambiente, siempre habrá margen para realizar mejoras a medida que avance la tecnología y se acumule experiencia, y la cultura de la seguridad nuclear exige continuas evaluaciones y mejoras. Esto es particularmente importante en el caso del almacenamiento del combustible gastado, visto que grandes cantidades de dicho combustible se almacenarán durante un período más prolongado que el inicialmente previsto.

Hasta la fecha, la industria nuclear mundial ha acumulado 50 años de experiencia operacional en la esfera del almacenamiento, principalmente sobre la base de sistemas de almacenamiento en húmedo que representan una tecnología madura y eficaz. En los últimos veinte años, la industria también ha venido desarrollando la tecnología del almacenamiento en seco que, si bien se encuentra aún en la etapa de evolución, ya puede considerarse como establecida. Además del rediseño de las piscinas de almacenamiento existentes, el almacenamiento en seco es ahora generalmente la tecnología preferida en todo el mundo para aumentar la capacidad de almacenamiento. Entre octubre de 2000 y septiembre de 2001 se pusieron en funcionamiento nuevas instalaciones de almacenamiento en seco en Armenia, Estados Unidos de América, Suiza y Ucrania. En Alemania, Canadá, España, Estados Unidos de América, Hungría y Ucrania se está construyendo capacidad de almacenamiento en seco adicional. En Alemania, Argentina, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Italia, República Checa y Rumania, la construcción de capacidad de almacenamiento en seco adicional se encuentra en la etapa de planificación o autorización.

El 30 de agosto de 2001 COGEMA, la compañía francesa de reprocesamiento de combustible, y Electricité de France firmaron un nuevo contrato de reprocesamiento que abarcará la parte final de gran parte del ciclo del combustible francés durante los próximos siete años.

Recientemente se registraron otros dos acontecimientos importantes: en primer lugar, la aprobación de una nueva ley rusa en julio de 2001, que permite la importación de combustible nuclear gastado para su almacenamiento indefinido y/o reprocesamiento. Ello ofrece la posibilidad de contar con instalaciones de almacenamiento de combustible gastado y/o instalaciones de disposición final geológica regionales o internacionales, posibilidad que podría tener ventajas comparativas desde el punto de vista tanto de la seguridad como de la eficacia. En segundo lugar, cabe mencionar la entrada en vigor en junio de 2001 de la Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos. La Convención, que hasta diciembre de 2001 había sido ratificada por 27 Estados Miembros, somete las prácticas nacionales en materia de gestión de desechos radiactivos a exámenes internacionales por homólogos. De esta manera se logrará, entre otras cosas, que la cuestión de la gestión de los desechos radiactivos sea más transparente para el público, con lo que se espera contribuir a una mayor aceptación pública y política de las instalaciones de gestión de desechos radiactivos.

II-2.5.2. Desechos radiactivos

La mayor parte de los desechos nucleares son de actividad baja e intermedia (LILW) (véase la Fig. II-5). Aunque durante decenios se han explotado instalaciones de LILW en muchos países, algunos (como Bélgica, Hungría y la República de Corea) han tenido dificultades para emplazar instalaciones de disposición final de LILW.

Se prevé que la cantidad de LILW aumentará considerablemente en los próximos decenios como resultado del creciente número de reactores que han de clausurarse. En diciembre de 2000, 93 centrales nucleares a escala comercial de 16 países se encontraban en alguna etapa de la clausura, y la AIE calcula que el número total de centrales nucleares retiradas de servicio durante el período 1997-2020 ascenderá a 135. Las centrales nucleares que se han cerrado prematuramente han sido por lo general más pequeñas que el promedio. Por lo tanto, puede esperarse que los retiros futuros generarán mayores cantidades de LILW.

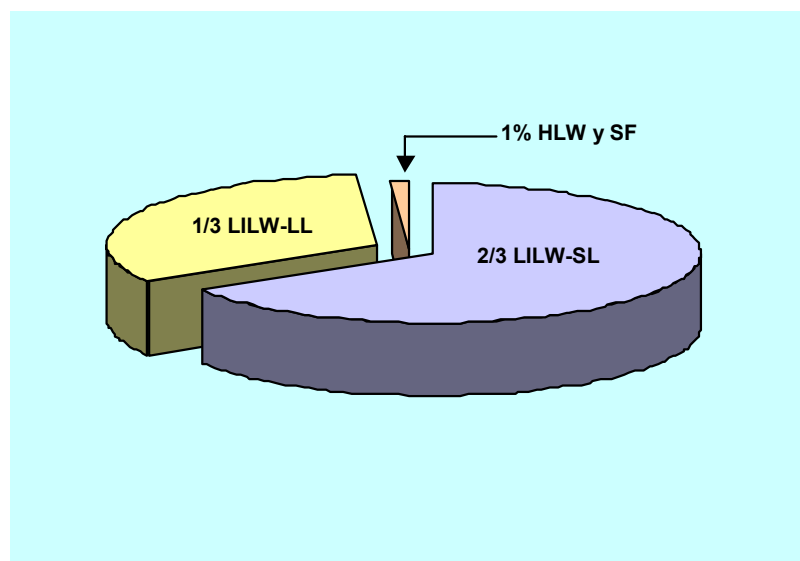


Figura II-5. Distribución, por volumen, de los desechos en la Unión Europea (HLW = desechos de actividad alta; SF = combustible gastado; LILW-LL = desechos de actividad baja e intermedia - de período largo; LILW-SL = desechos de actividad baja e intermedia - de período corto)

II-2.5.3. Desechos de actividad alta

En la actualidad, el principal problema respecto de la aceptación política y pública es la disposición final del combustible gastado y de los HLW. En la mayoría de los países, el método preferido es la disposición final geológica con empleo de barreras tanto naturales como artificiales para aislar los desechos durante muchos miles de años. Los países han adoptado una serie de enfoques para determinar posibles emplazamientos. En Suecia se han seleccionado dos de seis comunidades posibles que han dado su consentimiento, para investigaciones geológicas detalladas. Estas actividades deberían iniciarse en 2002 y tendrían una duración de cinco o seis años. La compañía sueca encargada de la gestión del combustible y los desechos nucleares, SKB, espera poder presentar una propuesta de emplazamiento definitiva hacia 2007. En diciembre de 2000, el Gobierno de Finlandia aprobó una solicitud para la adopción de una decisión “en principio”, presentada por Posiva, la compañía de desechos nucleares, respecto de la construcción de un repositorio para la disposición final del combustible gastado en una caverna situada cerca de las centrales nucleares en Olkiluoto. El Parlamento ratificó la decisión en mayo de 2001. Además, será necesario que el Gobierno expida por separado las licencias de construcción y explotación. La construcción se iniciaría en 2011 y la explotación unos diez años más tarde. En mayo de 2002, cuando el Parlamento ratificó la decisión en principio de construir una quinta central finlandesa, también ratificó una decisión por separado en principio de depositar también el combustible gastado del nuevo reactor en Olkiluoto.

En los Estados Unidos de América, la Planta Piloto para el Aislamiento de Desechos (WIPP) comenzó a recibir en 1999 desechos transuránicos de origen militar para su disposición final permanente. En mayo de 2001, el Departamento de Energía (DOE) determinó que la instalación de disposición final de Yucca Mountain cumplía las normas de radiación establecidas por la Agencia de Protección del Medio Ambiente a principios de ese año, a saber, 15 mrem (0,15 mSv) por año en el perímetro del emplazamiento durante 10 000 años, de los cuales no más de 4 mrem (0,04 mSv) por año pueden provenir del agua subterránea. (A los fines de la

comparación, la radiación natural de fondo media anual en los Estados Unidos de América es de aproximadamente 300 mrem (3 mSv)). En febrero de 2002 el Presidente Bush aprobó seguir adelante con el proyecto de Yucca Mountain. El Estado de Nevada presentó oficialmente su objeción. El Congreso debe desestimar explícitamente esa objeción a más tardar el 27 de julio, en favor de lo cual votó la Cámara de Representantes en mayo. El Senado todavía no ha votado.

II-2.5.4. Demostración de la disposición final geológica

Los países que están estableciendo repositorios geológicos para la disposición final de HLW han adoptado por lo general un enfoque gradual que incluye un período de intensas investigaciones y pruebas subterráneas. En el cuadro II-4 figuran las principales instalaciones de investigación subterráneas existentes.

Visto que el establecimiento de esas instalaciones entraña un proceso costoso y laborioso, los Gobiernos del Canadá y Bélgica han ofrecido poner a disposición del Organismo sus instalaciones de investigación subterráneas como centros internacionales de demostración y capacitación para científicos provenientes de Estados Miembros con limitados recursos. En octubre de 2001 el Organismo convocó una reunión para definir el alcance del proyecto, que despertó gran interés, particularmente entre los Estados Miembros con programas de disposición final geológica menos desarrollados, y actualmente se está estableciendo una red de investigación para prestar asistencia en las primeras etapas de desarrollo del programa, tales como las relacionadas con las tecnologías para la caracterización de emplazamientos, los criterios para la selección de emplazamientos, la evaluación del comportamiento general y la evaluación de conceptos.

Prosiguen las investigaciones sobre la disminución de los volúmenes de desechos mediante el empleo de nuevas técnicas para reducir la producción de actínidos y transmutar los desechos radiactivos de período largo. También prosiguen las investigaciones sobre los métodos para la recuperación de los desechos de los repositorios geológicos después de su disposición final. La cuestión de los méritos relativos de la disposición final permanente respecto de la recuperable sigue siendo objeto de discusión a nivel político, y con el tiempo los diferentes países podrían sopesar esos méritos de manera distinta. La disposición final recuperable podría ajustarse mejor a los cambios futuros de la tecnología y a las preferencias sociales. La disposición final permanente puede reducir las necesidades de salvaguardias y de una gestión activa.

Cuadro II-4. Principales instalaciones de investigación subterráneas (información compilada por consultores en una reunión patrocinada por el OIEA en 1999)*

PAÍS	LUGAR	NOMBRE USUAL/TIPO DE INSTALACIÓN	ROCA HOSPEDANTE /FORMACIÓN	PERÍODO
ALEMANIA	ASSE	Galerías de ensayo en mina de K/sal	Sal de bóveda	1977-1995
	GORLEBEN	URL	Sal de bóveda	desde 1997 (actualmente parada)
	KONRAD	Galerías de ensayo en mina de Fe	Esquistos	desde 1980
BÉLGICA	MOL	HADES + URF PRACLAY	Arcilla plástica	desde 1980
CANADÁ	LAC DU BONNET Manitoba	URL	Granito	desde 1984
ESTADOS UNIDOS	Emplazamiento de ensayo de NEVADA	CLIMAX	Granito	1978-1983
	Emplazamiento de ensayo de NEVADA	"G-Tunnel"	Tobas volcánicas	1979-1990
	CARLSBAD	WIPP	Yacimiento de sal estratificada	desde 1982
	YUCCA Mtn.	ESF	Tobas volcánicas	desde 1993
	YUCCA Mtn.	Busted Butte	Tobas volcánicas	desde 1997
FINLANDIA	OLKILUOTO (en repositorio VLJ)	Túnel de investigación	Granito	desde 1993
FRANCIA	FANAY Augères/Tenelles	Galerías en minas de U	Granito	1980-1990
	AMELIE	Galerías en mina de K	Yacimiento de sal estratificada	1986-1994
	TOURNEMIRE	Galerías de ensayo	Esquistos	desde 1990
JAPÓN	TONO	Galerías en minas de U	Piedra arenisca	desde 1986
	KAMAISHI	Galerías en mina de Fe-Cu	Granito	1988-1998
SUECIA	STRIPA	Galerías en mina de Fe	Granito	1976-1992
	ÅSPÖ	HRL	Granito	desde 1990
SUIZA	GRIMSEL	GTS en túnel de presa	Granito	desde 1983
	MONT TERRI	Galerías en túnel de carretera	Esquistos	desde 1995

* Instalaciones existentes en las que se realizaban y/o todavía se realizan ensayos.

PARTE III

APLICACIONES EN MATERIA DE ALIMENTOS, AGUA Y SALUD

III-1. AGRICULTURA SOSTENIBLE E INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS

III-1.1. Mejora de los cultivos

La aplicación de rayos gamma, rayos X, neutrones rápidos y productos químicos en los programas fitogenéticos ha propiciado el desarrollo de nuevas variedades de cultivos, mejores características agronómicas, y mayor rendimiento, calidad y tolerancia a tensiones abióticas y bióticas. Se han iniciado programas fitogenéticos destinados a lograr mejoras genéticas mediante técnicas de mutación con el fin de resolver problemas de producción o calidad de cultivos tradicionales como teff, amaranto, noug, bambara, altramuz, guija y malanga. Con los últimos adelantos hechos en la secuenciación de los genomas y la determinación de los genes, el próximo reto será asignar funciones a los genes. La mutagénesis química, por radiaciones y con transposones es el instrumento más versátil para evaluar la función de los genes y facilitar el proceso de mejoramiento genético.

Las técnicas nucleares también se utilizan en la agricultura para obtener datos singulares y cuantitativos sobre las tasas de reacción de los procesos del suelo y evaluar los métodos que contribuyen a resolver los problemas del suelo. Un ejemplo es una técnica basada en el radionucleido del cesio 137 presente en la precipitación radiactiva que se está utilizando para obtener estimaciones integradas de las tasas de erosión en el espacio y en el tiempo a efectos de evaluar la eficacia de las medidas de conservación del suelo.

En muchos países, el isótopo estable nitrógeno 15 también se utiliza para individualizar inoculantes de leguminosas y genotipos de leguminosas eficaces; evaluar el valor de los residuos orgánicos como fuentes de nitrógeno de los cultivos; y controlar el movimiento del nitrato derivado de los fertilizantes en relación con las aguas superficiales y las aguas subterráneas. El isótopo radiactivo fósforo 32 se utiliza de manera similar para evaluar la reactividad de distintas fuentes de fosfato mineral como fertilizantes, y determinar variedades de cultivo o genotipos eficaces que retengan el escaso fósforo que contienen los suelos ácidos tropicales. El isótopo estable carbono 13 se utiliza para acopiar información específica sobre las tasas de secuestro de carbono de los residuos de cultivos y las pérdidas simultáneas de carbono autóctono, añadiendo una nueva dimensión al conocimiento de la dinámica y el balance del carbono y en diversos sistemas de cultivo y labranza y zonas agroecológicas.

La técnica de los insectos estériles (TIE), que entraña la producción en gran escala y la suelta sistemática de insectos esterilizados por radiación gamma de una población plaga es un método inocuo para el medio ambiente de lucha contra las plagas, que ha contribuido con gran eficacia a reducir el uso de insecticidas para combatir varias plagas importantes de insectos. La capacidad de producción en masa de moscas de la fruta estériles, plaga muy conocida por su gran importancia económica y requisitos de cuarentena, se está acrecentando rápidamente (Fig. III-1). La tecnología de la TIE para suprimir, contener o erradicar estas plagas de insectos se ha aplicado de manera más generalizada en los últimos años después del éxito del primer programa a gran escala de la TIE destinado a prevenir la propagación de la mosca de la fruta del mediterráneo

(moscamed) en México. También se han obtenido éxitos similares en programas de lucha contra la mosca de la fruta en Australia, Argentina, Chile, Estados Unidos y Japón.

El uso exclusivo de cepas de machos en la TIE contra la moscamed se aplica actualmente como norma para esta tecnología. Actualmente se dispone de cepas mejoradas marcadas por métodos moleculares, con mayor producción y estabilidad. Estas cepas de sexaje genético han permitido que las instalaciones de producción de moscas y las autoridades de protección fitosanitaria produzcan y liberen sólo insectos machos estériles, reduciendo así los costos de reproducción y aumentando la eficacia de las moscas liberadas. Esto a su vez ha facilitado la aplicación de la TIE para suprimir plagas de insectos de las frutas en sustitución de los insecticidas y no sólo como un instrumento de erradicación. La viabilidad de este enfoque ha sido confirmada por los proyectos piloto de supresión basados en la TIE ejecutados en diversos países, incluidos Filipinas, Israel, Jordania, Sudáfrica y Tailandia. Se están iniciando proyectos integrados de supresión similares en varios países de América Central y la cuenca del Mediterráneo. La TIE para la mayoría de las plagas de insectos está en fase de desarrollo, y actualmente están en marcha proyectos operacionales contra la polilla de la manzana en el Canadá y contra el gusano rosado del algodón en los Estados Unidos.

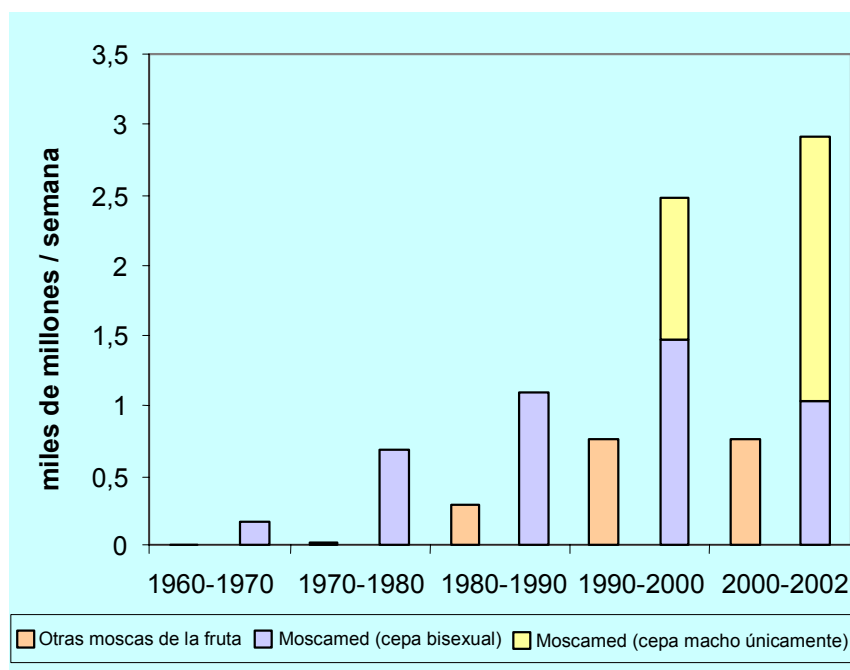


Figura III-1. Capacidad actual de producción mundial de moscas de la fruta estériles

Los beneficios económicos de la TIE son significativos. Mantener el territorio de México libre de la moscamed a un costo anual de aproximadamente 10 millones de dólares ha protegido mercados de exportación de frutas y verduras de más de 1 000 millones de dólares anuales. La erradicación de la moscamed en Chile en 1995 se calcula que haya generado posibles mercados de exportación de frutas frescas de hasta 500 millones de dólares anuales. Los programas de supresión basados en la TIE han reducido con eficacia aplicaciones de insecticidas y pérdidas de frutas, así como rechazos debidos a la presencia de plagas en exportaciones de frutas frescas, lo que ha representado importantes ahorros y beneficios ambientales. En Israel, por ejemplo, la

supresión de la mosca mediana mediante la TIE ya ha producido exportaciones anuales de pimientos y tomates valoradas en 5 millones de dólares.

En lo que concierne a la mutación de cultivos para aumentar la producción, durante el último decenio el mundo de la genética pura entró en una nueva era de la genómica: el estudio de todos los genes y su función. Se dispone ya de mucha información sobre la secuencia del ADN, en particular del arroz y la Arabidopsis. Sin embargo, las funciones de los genes derivados son en su mayoría desconocidas. Los esfuerzos concentrados de investigación se dirigen a resolver la denominada “desviación fenotípica”. Para ello se ha reforzado la demanda de material vegetal mutagenizado. La inducción de la mutación mediante técnicas nucleares desempeña un importante papel en la generación de poblaciones de mutantes deseadas. Los últimos informes sobre la homología y el ordenamiento de los genes entre, por ejemplo, los genomas vegetales (sintenia) sugieren que los conocimientos adquiridos también serán útiles para especificar y aislar los genes de cultivos subutilizados. La distribución del material permitirá que los fitogenetistas y genetistas de todo el mundo dispongan de valiosos mutantes de cultivos en otros lugares que no sean aquéllos en que se produjeron.

Con vistas al mejor aprovechamiento del suelo, la creación, el perfeccionamiento y la calibración de las técnicas basadas en el cesio 137 han aportado un instrumento universal para cuantificar las tasas de redistribución del suelo en una diversidad de ecosistemas naturales y agrícolas. Con todo, el factor limitante de la metodología son los bajos niveles de los inventarios de cesio 137 y, por tanto, la adquisición de equipo moderno de recuento por las instituciones de los países en desarrollo será fundamental para la aplicación más difundida de la metodología. Se requieren más actividades de investigación y desarrollo sobre el uso combinado del cesio 137 y otros radionucleidos presentes en la precipitación radiactiva, como el plomo 210 y el berilio 7, para evaluar la erosión a largo y corto plazos y las tasas de sedimentación.

Hay muchas posibilidades de ampliar las actuales aplicaciones de la TIE y desarrollar aún más la tecnología para facilitar las aplicaciones contra otras plagas de insectos importantes. La TIE también se está considerando cada vez más como instrumento de erradicación para hacer frente al problema creciente de los brotes incipientes de especies exóticas invasivas antes de que se establezcan con carácter permanente. Las cepas transgénicas de muchas plagas de insectos ya están asequibles y se están utilizando para elaborar nuevos métodos de control y aumentar la eficiencia de la TIE. Una ventaja notable de la tecnología transgénica podría ser la capacidad para utilizar el mismo método molecular en muchas especies de plagas diferentes.

III-1.2. Aumento de la productividad del ganado

La ingeniería genética está ahora a la vanguardia de las investigaciones biológicas básicas, adaptativas y aplicadas o de aquellas cuyos resultados están a punto de salir al mercado. En el centro de las investigaciones destinadas a aumentar la productividad del ganado o reducir las pérdidas provocadas por las enfermedades está el uso de los nucleótidos marcados con ^{32}P y ^{33}P , y los aminoácidos y proteínas con ^{131}I que dan una señal mensurable para especificar y caracterizar los genes, y para marcar proteínas expresadas in vitro y otros compuestos biológicamente activos.

La técnica de los insectos estériles no sólo puede utilizarse para el control de las plagas de insectos; también puede desempeñar un importante papel en la lucha contra las enfermedades del ganado al controlar las plagas transmisoras de enfermedades. La tripanosomiasis transmitida

por la mosca tsetsé sólo ocurre en el África subsahariana, donde esta enfermedad ha impedido el uso de ganado rumiante en gran parte de las labores agrícolas. Se han logrado importantes mejoras en la producción en masa, el control de calidad y el sexaje de las moscas tsetsé después de aplicar la TIE para erradicar la mosca tsetsé en Zanzíbar en 1996. La tecnología mejorada se está aplicando gracias a los esfuerzos conjuntos de varios organismos, y se están efectuando los preparativos para ejecutar varios proyectos piloto sobre la TIE en zonas aisladas del continente africano, sobre todo en Botswana, Etiopía y Malí.

Se están adoptando medidas de armonización para combatir otra plaga importante del ganado, los insectos causantes de la miasis (como el gusano barrenador del Viejo Mundo) que atacan el ganado y otros animales de sangre caliente. La Organización Árabe para el Desarrollo Agrícola, la FAO y el OIEA están colaborando en un proyecto conjunto de viabilidad regional en las regiones de Asia occidental y sudoriental. La TIE se aplica actualmente para erradicar el gusano barrenador del Nuevo Mundo en Jamaica y con el fin de mantener una barrera de moscas estériles en Panamá para proteger la región de América del Norte y América Central, donde el gusano barrenador del Nuevo Mundo ya ha sido erradicado.

Las futuras investigaciones se centrarán en la ampliación y profundización del uso de las tecnologías antes descritas. La aplicación sobre el terreno de muchos de los productos puede verse limitada, al menos inicialmente, por consideraciones e intereses éticos y ecológicos asociados a los derechos de propiedad intelectual, pero hay muchas posibilidades de aumentar aún más la rentabilidad de la TIE para la erradicación del gusano barrenador y la mosca tsetsé, y para ampliar el desarrollo y empleo de esta técnica con objeto de ayudar a hacer frente a otras plagas de insectos del ganado. La aplicación integrada en gran escala de la TIE, particularmente para liberar importantes zonas del África subsahariana de la mosca tsetsé, dependerá de que las empresas públicas y privadas presten los diversos servicios que se requieren en estos programas de erradicación.

III-1.3. Inocuidad de los alimentos

La irradiación de los alimentos ha surgido como un tratamiento sanitario y fitosanitario viable para que los alimentos cumplan los requisitos estipulados en el Acuerdo sobre la Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (AMSF) y en el Acuerdo sobre Barreras Técnicas al Comercio (ABTC) de la Organización Mundial del Comercio. Hoy más de 30 países emplean esta tecnología para garantizar inocuidad y la calidad y para cumplir los reglamentos de cuarentena en el comercio de algunos alimentos, incluidos los productos cárnicos, las frutas frescas, las especias y los condimentos de hortalizas desecadas. La irradiación en gran escala comercial de carne molida para garantizar la seguridad microbiológica comenzó en los Estados Unidos a mediados del decenio de 2000, y los productos irradiados se han vendido extensamente en más de 2 000 supermercados en 2001, evidentemente sin resistencia de los consumidores. Muchos otros países, sobre todo de Asia y el Pacífico, América Latina y algunos países del Oriente Medio y África, podrían beneficiarse inmensamente de esta tecnología para reducir las pérdidas de alimentos posteriores a la cosecha, controlar varias enfermedades transmitidas por los alimentos y facilitar el comercio de alimentos. Si la industria de irradiación de alimentos sigue creciendo, ello exigirá la difusión más amplia entre los países productores de capacidades para medir la radiación administrada.

La Comisión del Codex Alimentarius está elaborando y revisando las normas/directrices y recomendaciones internacionales destinadas a garantizar la calidad e inocuidad de los alimentos,

incluidos los que son tratados por irradiación, así como los que pueden ser contaminados por agentes químicos y biológicos. Gracias a la colaboración internacional, el detector de captura de electrones no sólo es aceptado actualmente, sino que es el que más se utiliza para detectar contaminantes de alimentos y analizar muestras ambientales. Las técnicas de radiotrazadores también se emplean para aumentar la velocidad y precisión en diversos análisis de contaminantes de alimentos, con los consiguientes ahorros en los costos de los reactivos.

Cada vez se harán más necesarios los isótopos y las radiaciones para tratar los alimentos y garantizar su inocuidad y calidad o para elaborar, validar y normalizar los métodos de bajo costo de análisis de contaminantes y residuos de alimentos que resultan adecuados para los países en desarrollo. Entre los nuevos problemas que afectan a la salud humana y el comercio de productos agrícolas se cuentan los riesgos derivados de los residuos de medicamentos veterinarios, incluidos los riesgos de la transferencia de patógenos resistentes a antibióticos de los animales a las personas y la contaminación de los alimentos por micotoxinas. La capacitación concertada, los métodos analíticos (especialmente el radioinmunoanálisis) y una respuesta más coordinada son elementos que deben reforzarse en los países en desarrollo.

III-2. RECURSOS HÍDRICOS

La energía nuclear tiene dos contribuciones que hacer a los esfuerzos que se realizan a nivel mundial para ampliar los recursos de agua dulce. En primer lugar están las aplicaciones de los isótopos en la hidrología basadas en el uso de las “huellas isotópicas” que han quedado espontáneamente en el agua para obtener rápidamente información hidrológica de grandes zonas. En segundo lugar está la posibilidad de la desalación nuclear del agua de mar de los océanos del mundo.

Son cada vez más numerosos los laboratorios de hidrología isotópica y estaciones en red para la vigilancia mundial de los isótopos en las precipitaciones. También está aumentando el número de documentos editados en publicaciones científicas importantes, lo que sugiere el aumento del uso de los isótopos en la hidrología como uno de los instrumentos de investigación (Fig. III-2). Aunque el campo de aplicación dominante se relaciona con las aguas subterráneas, las aplicaciones en los estudios sobre el cambio climático, prácticamente inexistentes en 1960, han aumentado hasta alcanzar prácticamente el mismo nivel.

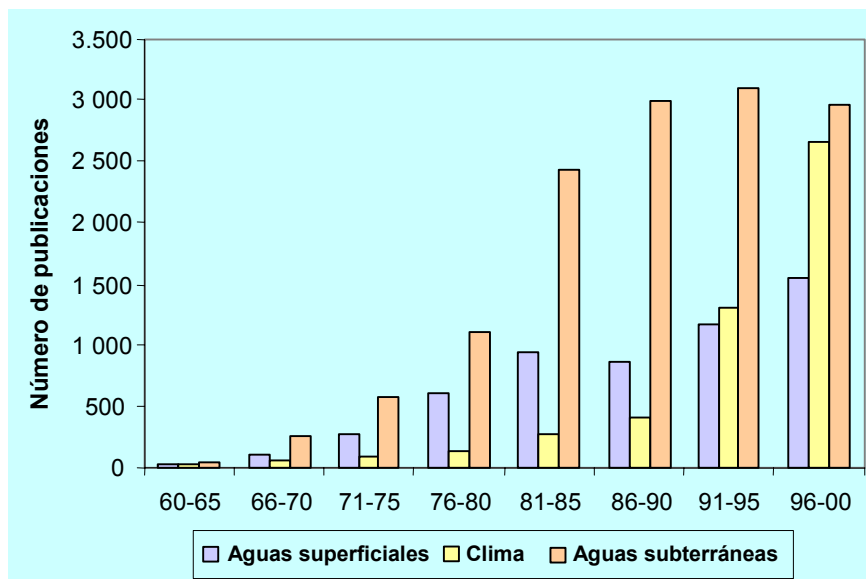


Figura III-2. Aumento de las publicaciones de hidrología isotópica

Las nuevas aplicaciones de la hidrología isotópica en el futuro se beneficiarán de constantes avances en los métodos y los instrumentos analíticos y de la disponibilidad de datos isotópicos a escala mundial. El incremento del uso de métodos muy sensibles de espectrometría de masas por aceleradores (AMS) ha difundido más la aplicación de los métodos basados en el carbono 14. El análisis por AMS del tritio en muestras de pequeño tamaño se está desarrollando aún más para crear nuevas esferas de aplicación de las mediciones basadas en el tritio.

Ya están a punto de ultimarse métodos espectroscópicos viables sustitutivos de los sistemas convencionales de espectrometría de masas para medir la abundancia de isótopos estables. Los métodos espectroscópicos exigen menos aptitudes operacionales y menos infraestructura básica que los espectrómetros de masas y es probable que aumenten considerablemente el acceso a las instalaciones de medición isotópica de muchos países.

Pasando a la desalación nuclear, el Japón ha acumulado más de 100 años-reactor de desalación nuclear. Kazajstán había acumulado 26 años-reactor antes de poner en régimen de parada el reactor reproductor rápido de Aktau al final de su vida útil en 1999. El interés está motivado por la creciente demanda mundial de agua dulce, por la preocupación que suscitan las emisiones de gases de efecto invernadero, por la contaminación que crean los combustibles fósiles, y por los adelantos alcanzados en los reactores de pequeña y mediana potencia, que podrían ser más adecuados para la desalación que los reactores de gran potencia. El OIEA está ampliando su Sistema de información sobre los reactores de potencia para introducir los datos sobre más de 50 reactores nucleares de potencia conectados a los sistemas de aplicaciones térmicas, incluida la desalación.

Egipto está a punto de finalizar un estudio de viabilidad de una planta de cogeneración nuclear (electricidad y agua) en el emplazamiento de El-Dabaa. Francia está promoviendo un estudio europeo conjunto sobre desarrollo de reactores para desalación nuclear (proyecto EURODESAL). En la India se están realizando obras civiles y de ingeniería para una planta de demostración de desalación nuclear de 6 300 m³/d en Kalpakkam, teniéndose previsto iniciar su

puesta en servicio a principios de 2002. El Canadá ha construido un dispositivo para pruebas para verificar el comportamiento del proceso de ósmosis inversa de precalentamiento. China comenzó un estudio de previabilidad de una planta de desalación nuclear de agua de mar en la zona de Yantai con la utilización de un NHR-200. La República de Corea sigue adelante con el diseño básico del concepto SMART. El Pakistán continúa su labor para establecer una planta de demostración de desalación nuclear que se ha de conectar con la central nuclear de Karachi. La Federación de Rusia está trabajando en el diseño de una unidad de potencia flotante y tiene previsto construir una planta piloto en 2005-2006. Túnez está planificando un estudio de previabilidad de una planta de desalación nuclear adaptada a las condiciones específicas del emplazamiento.

III-3. SANIDAD HUMANA

Las aplicaciones de diagnóstico más difundidas de la radiación ionizante y de las técnicas nucleares son la formación de imágenes con rayos X en radiología de diagnóstico y el empleo de trazadores biológicos radiactivos en medicina nuclear. El campo dominante en la aplicación terapéutica de las radiaciones para la salud es la radioncología, que entraña el suministro de dosis curativas de radiación a volúmenes blanco en pacientes con cáncer, generalmente desde una fuente de radiaciones sólida ubicada fuera del paciente (teleterapia) o dentro del paciente (braquiterapia). La terapia mediante la administración sistémica de materiales radiactivos (terapia con fuentes radiactivas abiertas) se viene utilizando desde hace muchos años en el tratamiento de enfermedades de la tiroides, pero actualmente están surgiendo muchas nuevas aplicaciones terapéuticas con fuentes radiactivas abiertas. En esta sección también se abordan los métodos que utilizan isótopos estables para el diagnóstico y la gestión de la malnutrición, que constituyen un campo de aplicación relativamente nuevo.

III-3.1. Aplicaciones de diagnóstico

III-3.1.1. Radiología de diagnóstico

En el decenio de 1970 el desarrollo de la tomografía computada revolucionó la radiología de diagnóstico al proporcionar imágenes de cortes transversales de alta calidad de los pacientes. Los avances más recientes de la tecnología de computadoras permiten que los radiólogos superpongan imágenes de rayos X a las procedentes de varias otras modalidades, incluidas la formación de imágenes por resonancia magnética nuclear y las exploraciones con radionucleidos, de modo que la información anatómica y funcional puede registrarse adecuadamente. La siguiente innovación de importancia probablemente tenga que ver con la formación de imágenes digitales por rayos X mediante el empleo de una nueva generación de detectores. Las ventajas de los sistemas digitales frente a los convencionales residen en la manipulación, almacenamiento, transmisión a distancia y posiblemente costo, de las imágenes.

III-3.1.2. Medicina nuclear

Estudios funcionales de medicina nuclear con y sin formación de imágenes

Los estudios funcionales de medicina nuclear con y sin formación de imágenes ofrecen aplicaciones de diagnóstico e investigación de las fuentes abiertas de radiactividad administradas internamente. Apoyan también aplicaciones terapéuticas con fuentes radiactivas abiertas (véase

la sección III.3.3). Estas técnicas se utilizan en una gran variedad de especialidades tales como oncología, endocrinología, cardiología, neurología y nefrología. Se dispone ahora de casi un centenar de distintos procedimientos normalizados, de diagnóstico y terapéuticos, en medicina nuclear.

En la mayoría de los países desarrollados se aprecia la tendencia a someter a muchos pacientes hospitalarios a procedimientos terapéuticos o de diagnóstico de medicina nuclear puesto que la especialidad está establecida y existen procedimientos con radionucleidos para efectuar sistemáticamente aplicaciones cotidianas. No obstante, en el mundo en desarrollo la medicina nuclear aún no está integrada en los sistemas de atención de salud ordinarios. En la mayor parte de los países en desarrollo esta especialidad existe en centros puntuales de excelencia en las grandes zonas urbanas, en tanto que las personas que viven en zonas rurales no tienen acceso a instalaciones de este tipo. El número de cámaras gamma existentes en un país es un indicador razonable de la situación de la medicina nuclear, y los datos mundiales correspondientes a los países desarrollados indican 20 cámaras gamma por millón de habitantes, frente a 0,8 para los países en desarrollo. Una carencia de equipo de esta magnitud contribuye a la migración del personal médico nuclear calificado hacia los países desarrollados.

Medicina nuclear molecular

La medicina nuclear molecular es un campo de aplicaciones incipiente que trabaja con la formación de imágenes de una enfermedad a nivel celular o genético más bien que a una escala mayor. Los avances más recientes son prometedores, particularmente en la formación de imágenes de la expresión de genes. Estas técnicas moleculares proporcionan los medios para examinar fármacos activos in vivo, crear imágenes de procesos moleculares y diagnosticar enfermedades en una etapa presintomática.

La reacción en cadena de la polimerasa (PCR) es uno de los ejemplos mejores y más comúnmente aplicados de las técnicas moleculares in vitro en la esfera de la salud humana, especialmente en el campo del diagnóstico y la epidemiología molecular. Se han encontrado muchas aplicaciones para la PCR tanto en la investigación básica como en el entorno clínico. Se utiliza para diagnosticar la leucemia, enfermedades infecciosas como la enfermedad de Chagas, la leishmaniosis, la hepatitis B y la tuberculosis, así como trastornos genéticos tales como la talasemia y la distrofia muscular. La detección directa de las mutaciones que causan la resistencia a los medicamentos en la malaria y la tuberculosis es una de las aplicaciones más importantes de la PCR que se está investigando en la actualidad. La técnica es extremadamente sensible, ya que, por ejemplo, su empleo permite detectar hasta una sola célula anormal entre un millón.

Hasta agosto de 2001, la Food and Drug Administration de los EE.UU. había aprobado 25 pruebas de diagnóstico molecular in vitro: 18 para enfermedades infecciosas (por ejemplo, chlamydia, VIH), seis para cánceres (por ejemplo, leucemia), y una para el síndrome de Down. Un informe reciente titulado *Successful Business Strategies for Companies in the Diagnostics Industry* pronostica que uno de los mayores aumentos se registrará en la esfera del diagnóstico molecular [14].

Radioinmunotecnología in vitro

El radioinmunoanálisis e inmunotecnología conexas constituyen componentes importantes del sistema de diagnóstico in vitro para la cuantificación de los cambios en las proteínas así como otros metabolitos intermedios importantes en los estados de enfermedad.

Se prevé que los ingresos por concepto de venta mundiales correspondientes a los productos de diagnóstico in vitro continuarán aumentando, y pasarán de 20 000 millones de dólares en 1999 a 26 500 millones en 2004. El inmunoanálisis representa el 10% aproximadamente, es decir de 2 000 a 2 650 millones de dólares de los ingresos por concepto de diagnóstico in vitro. Un reciente estudio de la documentación médica indica una declinación moderada en la utilización del radioinmunoanálisis, con un aumento concomitante en las técnicas que utilizan análisis no radiactivos tales como el ensayo inmunoabsorbente por conjugados enzimáticos (ELISA). No obstante, debido a su bajo costo los métodos de radioinmunoanálisis siguen utilizándose ampliamente en el diagnóstico patológico clínico ordinario en los países en desarrollo e incluso en algunos laboratorios de gran volumen de actividad de los países desarrollados. Se utilizan también eficazmente en la labor preliminar para estudiar nuevos métodos en relación con solicitudes de patente, y son también un patrón de referencia excelente para la verificación de los análisis no isotópicos.

Por lo que se refiere a tendencias futuras, seguirán introduciéndose nuevos radiofármacos en forma de metabolitos marcados, oligonucleótidos, hormonas, enzimas, medicamentos, receptores y anticuerpos monoclonales para el diagnóstico precoz y el tratamiento de enfermedades. Además de la detección y el tratamiento, la medicina nuclear adquiere cada vez mayor importancia para la prognosis de la respuesta al tratamiento, la determinación de la viabilidad de los tejidos y la promoción de la terapia génica. La aplicación de la sonda gamma quirúrgica, que ha cambiado en forma radical el concepto del control del cáncer de mama y de colon continuará aumentando, y desempeñará un papel importante en la oncología clínica. La formación de imágenes por fusión (por ejemplo la fusión de la resonancia magnética/CT (tomografía computarizada) y de imágenes de medicina nuclear), con la ayuda de instrumentos de comunicación e información más modernos, mejorará aún más la estrategia de gestión en diversas afecciones cardiovasculares, neurológicas y oncológicas.

En el campo de la medicina nuclear molecular, seguirán utilizándose cada vez más las nuevas aplicaciones para el pronóstico de las terapias del cáncer y la detección de la resistencia a los medicamentos. Las aplicaciones futuras podrían incluir la elaboración de modelos moleculares para el diseño de fármacos, la terapia génica, la evaluación de la patogenicidad y la detección de enfermedades residuales mínimas.

III-3.2. Aplicaciones terapéuticas

III-3.2.1. Teleterapia y braquiterapia para el cáncer

El cáncer es una de las principales causas de mortalidad en los países industrializados, y el número de casos en los países en desarrollo se incrementa rápidamente a medida que aumenta la esperanza de vida. Se estima que se registraron aproximadamente 10 millones de nuevos casos de cáncer en todo el mundo en 2000, repartidos uniformemente entre los países desarrollados y en desarrollo. Según las proyecciones en 2015 habrá 15 millones de nuevos casos de cáncer y alrededor de 10 millones se producirán en los países en desarrollo. Las pautas en materia de

atención de pacientes con radioterapia son muy distintas, incluso en los países más industrializados. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América el 49% de los casos de cáncer diagnosticados recientemente se trata con radioterapia, en comparación con el 15% únicamente en el Japón [15]. En los países desarrollados, donde el control del cáncer integra la cirugía, la radioterapia y la quimioterapia, se logra una tasa de curación del 45%.

La teleterapia es la técnica de radioterapia que se utiliza con más frecuencia, en la cual la fuente de radiación está ubicada a una cierta distancia del paciente. La evolución de esta técnica ha pasado de la utilización de tubos de rayos X a máquinas en las que la irradiación gamma procede de fuentes de cobalto 60. Durante los últimos treinta años en los países industrializados se registró una tendencia hacia la utilización de aceleradores lineales para producir haces de electrones y rayos X de alta energía. Hoy en día la teleterapia puede suministrarse con gran exactitud para ajustarse incluso a formas de tumores sumamente irregulares sin afectar, por ello, a los tejidos sanos circundantes (terapia conformal). La braquiterapia, técnica en la que se emplean fuentes colocadas dentro del cuerpo, también ha cambiado a lo largo de su siglo de uso. El radio se ha sustituido casi en todos los casos por el cesio 137 y se utilizan cada vez más nuevas microfuentes de iridio 192 de tasa de dosis altas.

Disponibilidad y futura necesidad de la radioterapia

El OIEA mantiene un registro internacional de los hospitales e instituciones clínicas que ofrecen servicios de radioterapia que utilizan radionucleidos o equipo de teleterapia de energía alta. Esta base de datos, denominado Directorio de centros de radioterapia (DIRAC), incluye información detallada sobre equipo de radioterapia y braquiterapia, para dosimetría y para planificación de tratamientos, así como número de personas que trabajan en los centros y de pacientes tratados (véase el cuadro III-1). Aun cuando los países en desarrollo representan alrededor del 85% de la población mundial, los países desarrollados cuentan con dos tercios de las instalaciones de radioterapia de todo el mundo, el 82% de todos los aceleradores de electrones, y más del 30% del total de unidades de cobalto. En los países en desarrollo se encuentran instalados sólo unos 2 200 aparatos de teleterapia, principalmente unidades de cobalto 60, y 850 unidades de braquiterapia. Como cada aparato puede utilizarse en el tratamiento de aproximadamente 600 pacientes por año, la capacidad resultante es de alrededor de 1,9 millones de pacientes por año. Esto dista de ser suficiente para prestar servicios a la población actual, lo que significaría dar tratamiento a alrededor de 2,5 millones de pacientes de cáncer anualmente. Para atender a las necesidades actuales se necesitan unos 4 000 aparatos, lo que supone que faltan unos 1 000 más. Como ya se ha mencionado, para 2015 el número de nuevos pacientes por año en el mundo en desarrollo ascenderá a 10 millones, de los cuales 5 millones necesitarán alguna forma de radioterapia. Se precisarán alrededor de 10 000 aparatos para proporcionarles tratamiento.

Cuadro III-1: Datos del DIRAC correspondientes a agosto de 2001 relativos a los recursos mundiales de radioterapia: teleterapia y braquiterapia en los países en desarrollo y desarrollados (DIRAC, 2001)

	En desarrollo	Desarrollados	Total
Número de países	132 (81%)	30 (19%)	162
Centros de radioterapia	2 327 (44%)	2 986 (56%)	5 313
Teleterapia	2 195 (35%)	4 097 (65%)	6 292
Radionucleidos: ^{60}Co y ^{137}Cs	1 424 (69%)	634 (31%)	2 058
Aceleradores	771 (18%)	3 463 (82%)	4 234
Braquiterapia	845 (34%)	1 652 (66%)	2 497

Radioterapia con partículas pesadas

En julio de 2001 se había tratado con distintas partículas pesadas a un total de 34 440 pacientes en el mundo entero. La tendencia actual, para algunos países desarrollados, ha sido un aumento constante del número de aceleradores de partículas, predominantemente aceleradores de protones del orden de 200 a 250 MeV. La expansión más rápida se registra en el tratamiento de tumores bien definidos, particularmente el cáncer de la próstata y cordomas y condrosarcomas de la base del cráneo, en los que se ha demostrado la mayor eficacia de esta modalidad de tratamiento en comparación con la cirugía. Se continúa tratando los melanomas oculares, que son tumores oculares poco frecuentes, con ciclotrones de baja energía (60 a 70 MeV), técnica que compete con las placas unidas quirúrgicamente que contienen una serie de minúsculas semillas radiactivas o con las técnicas de fotones de aceleradores lineales más recientes. Constantemente se está desarrollando el uso experimental de la terapia con iones pesados (con el empleo de iones de helio fundamentalmente).

III-3.2.2. Terapia con fuentes radiactivas abiertas

El potencial de los radionucleidos para el tratamiento de ciertos tumores benignos y malignos se ha reconocido y utilizado en las últimas décadas en el tratamiento del cáncer de tiroides, del dolor óseo metastásico, de los tumores neuroendócrinos y del feocromocitoma maligno, del cáncer del hígado (carcinoma hepatocelular), y del linfoma de células B. Una nueva aplicación es la utilización de Lipiodol de yodo 131 o Lipiodol de renio 188 para el tratamiento del cáncer de hígado. El cáncer de hígado (o carcinoma hepatocelular), es una de las neoplasias malignas más comunes en el mundo entero que ocasiona casi un millón de muertes por año, la mayor parte de ellas en los países en desarrollo.

Se dispone en la actualidad de varios procedimientos terapéuticos con radionucleidos que además de utilizarse para el tratamiento del cáncer, se aplican también en enfermedades benignas tales como el hipertiroidismo, la restenosis de la arteria coronaria, la artritis reumatoide, y la hemoartrosis. La terapia con yodo 131 se ha aceptado desde hace mucho tiempo en todo el mundo como un procedimiento de tratamiento seguro y eficaz para el hipertiroidismo.

En relación con la angioplastia con globo para abrir las arterias coronarias ocluidas, existe gran interés en la nueva terapia con radionucleidos intravascular, y que utiliza radiofármacos lí-

quidos emisores beta para prevenir la restenosis. El procedimiento es eficaz en función de los costos, fácil de llevar a cabo, práctico y sumamente adecuado para los países en desarrollo.

La radiosinovectomía con utilización de radiofármacos emisores beta, particularmente de la articulación de la rodilla, ofrece un alivio considerable y duradero del dolor y otros síntomas en los pacientes con artritis reumatoide y hemoartrosis. El procedimiento es seguro, simple, y muy eficaz en función de los costos para los pacientes que sufren de esta enfermedad crónica y requieren tratamientos a largo plazo con analgésicos y otros medicamentos costosos.

III-3.3. Nutrición

La Comisión sobre los Problemas de la Nutrición en el Siglo XXI preparó un informe titulado *Ending Malnutrition by 2020: an Agenda for Change in the Millennium* para el Subcomité de Nutrición de las Naciones Unidas [16]. En el mismo se señalan el retardo del crecimiento intrauterino (24% de todos los nacimientos), la anemia (2 000 millones de niños y adultos), la deficiencia de vitamina A (250 millones de niños) y el retraso en el crecimiento (200 millones de niños), como los problemas más urgentes en los países en desarrollo. Se destacan la obesidad como una epidemia incipiente en los países desarrollados así como en desarrollo, y la salud de los ancianos como otra cuestión crítica. La osteoporosis es la enfermedad más debilitante para las personas de edad, y según la Organización Mundial de la Salud se producen más de 2 millones de fracturas de cadera/columna vertebral por año, la mayor parte en mujeres.

En los países desarrollados se centra mucha atención en la obesidad y la diabetes de tipo 2, pero la malnutrición marginal por carencia de micronutrientes puede ser un problema importante en grupos vulnerables, es decir, grupos de bajos ingresos, familias monoparentales, y personas de edad. En los países en transición, la economía y la nutrición van de la mano. Con el aumento de la prosperidad, la morbilidad de las enfermedades relacionadas con la nutrición está cambiando, pero al mismo tiempo persisten muchos de los antiguos problemas. En los países menos adelantados, la situación nutricional no está mejorando, con el resultado de que aún existe la malnutrición clásica proteicocalórica.

Algunos de los métodos utilizados corrientemente para evaluar la salud y el estado nutricional de una persona pueden ser invasivos, inexactos, insensibles a pequeños cambios y no fácilmente transferibles sobre el terreno. Las técnicas isotópicas y nucleares para complementar estas opciones se consideran como instrumentos esenciales en la investigación y nutrición aplicadas. Se han utilizado ampliamente en los países industrializados para analizar las necesidades energéticas humanas, la composición corporal, incluida la densidad mineral ósea, y el metabolismo de nutrientes importantes tales como las proteínas, las grasas, las vitaminas y los minerales. Se están introduciendo diversas aplicaciones estratégicas de las técnicas isotópicas en los países en desarrollo, donde pueden beneficiar a millones de personas mediante el mejoramiento de la vigilancia de la situación nutricional, y servir como indicadores específicos de progresos sociales y económicos más amplios. Entre los ejemplos prácticos se incluyen:

- El método del agua doblemente marcada ($^2\text{H}_2^{18}\text{O}$) es la única técnica que puede medir con exactitud las necesidades energéticas de las personas en su propio medio ambiente. El comité de expertos de la FAO/OMS/UNU convocado durante 2001 para establecer nuevas recomendaciones en materia de energía está utilizando los resultados de las investigaciones del consumo de energía de niños pequeños en Cuba y Chile, basadas en el método del agua doblemente marcada.

- Los métodos basados en la dilución isotópica con utilización de ^2H o ^{18}O se utilizan ahora ampliamente en el monitoreo de la composición corporal, especialmente en el contexto del inicio de la obesidad. Se han investigado más de 2 000 casos de personas de China, India, Nigeria y algunos otros países (que representan más del 40% de la población mundial) para determinar los cambios que dan lugar a la obesidad a fin de formular la atención preventiva correspondiente.
- En Chile y México se han introducido intervenciones en materia de nutrición a nivel nacional basadas en la tecnología de isótopos estables. En Chile, 300 niños participaron en un estudio piloto destinado a abarcar con el tiempo a 1,3 millones de niños en un programa nacional de intervención nutricional. En consecuencia, la anemia se redujo, pasando del 30% a menos del 5% después de un año de proporcionar alimentos de destete con suplementos de hierro. El resultado ha sido el suministro de alimentos fortificados con hierro y cinc en el programa nacional de alimentación suplementaria, con lo cual se espera que mejore el desempeño escolar y disminuyan las infecciones. México ha equipado un laboratorio con dos espectrómetros de masas de uso exclusivo en apoyo de la tecnología de isótopos estables para determinar los efectos de los suplementos alimentarios en un gran número de mujeres gestantes y lactantes, así como para observar el efecto de la fortificación con hierro y cinc.
- Se estima que para 2025 habrá 1 200 millones de ancianos en el mundo. Las técnicas basadas en la absorciometría por rayos X de energía doble ofrecen un método no invasivo para investigar las variaciones de la densidad mineral ósea.
- La diarrea persistente ocasiona más del 60% de las muertes de niños menores de un año en el Brasil, el 47% en la India, el 36% en Senegal y el 26% en Bangladesh. Las técnicas con isótopos estables son las mejores y las más eficaces en función de los costos para el diagnóstico de la infección por *Helicobacter pylori* mediante una simple prueba de aliento utilizando carbono 13.
- El Gobierno del Brasil proyecta emprender una evaluación de los programas de distribución de leche mediante la tecnología de isótopos estables, en la que participarán 2,5 millones de personas. En este primer estudio epidemiológico a realizarse en gran escala se emplearán métodos isotópicos para medir la composición corporal de un gran número de niños desnutridos.

PARTE IV

APLICACIONES EN LAS ESFERAS DEL MEDIO AMBIENTE Y LOS PROCESOS INDUSTRIALES SOSTENIBLES

IV-1. PROTECCIÓN MARINA Y TERRESTRE

IV-1.1. Medio ambiente marino

Las aplicaciones nucleares para la protección marina incluyen estudios sobre el impacto de la radiactividad en el océano procedente de la precipitación nuclear o de emisiones planificadas o accidentales, y la utilización de dicha radiactividad como un marcador para seguir la pista y comprender los procesos oceánicos directamente, así como la escorrentía y otra contaminación marina originadas en tierra.

Los estudios con trazadores isotópicos de los océanos han ayudado a determinar los modelos de circulación y el tiempo medio de residencia de masas de agua específicas, y a calcular los coeficientes de mezcla. Iniciado en el decenio de 1970, el Estudio Geoquímico de Secciones Oceánicas produjo el primer conjunto de datos amplios sobre los radionucleidos antropógenos y otros trazadores isotópicos presentes en los océanos Atlántico y Pacífico. Más recientemente, el Experimento mundial sobre la circulación oceánica generó datos isotópicos bidimensionales y tridimensionales de resolución aún más alta (^3H , ^3He , ^{14}C), que se han utilizado en estudios de la ventilación de las aguas superficiales en el Océano Pacífico, la dispersión de las aguas intermedias en los océanos Pacífico e Índico, y la circulación de las aguas profundas en el Océano Pacífico. La eliminación y el ciclado del dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero crítico, en los océanos son el centro de atención de un reciente programa internacional de ciencias oceánicas de gran envergadura (Estudio global conjunto de flujo oceánico). El programa coordinado de investigación sobre estudios de la radiactividad marina a nivel mundial proporciona la información más reciente y completa sobre los niveles y la distribución de los radionucleidos antropógenos, sus tendencias temporales, y sus tiempos medios de residencia en los océanos del mundo. En líneas más generales, en 1995 se aprobó el Programa de Acción Mundial para la protección del medio marino frente a las actividades realizadas en tierra (PMA), y se asignó al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) la tarea de dirigir la labor de coordinación. Entre los asociados en el sistema de intercambio de información del PMA se incluyen el OIEA, la OMI, la FAO y la OMS, conjuntamente con el PNUMA. Los aspectos importantes estudiados son los efectos de contaminantes tales como las aguas residuales, los contaminantes orgánicos persistentes, las sustancias radiactivas, los metales pesados, los hidrocarburos, los nutrientes, y la basura, junto con la alteración física y la modificación del hábitat.

Además de los radionucleidos antropógenos procedentes de la precipitación mundial (por ejemplo ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu y ^{240}Pu) que se han utilizado ampliamente como trazadores de los procesos oceánicos, los radionucleidos producidos por las plantas de reprocesamiento nuclear en Sellafield y La Hague constituyen nuevas e importantes señales de trazadores en los océanos Atlántico Norte y Ártico. Las inconfundibles firmas de tiempo y composición que producen estas dos señales probablemente sean de gran utilidad en los futuros estudios de las rutas y tasas de ventilación oceánica.

Los radionucleidos naturales (tales como los isótopos 210 plomo, radio, uranio y torio, y otros) se han utilizado también como trazadores naturales de la dinámica de los sedimentos y el agua y de la asociación, el transporte y el destino final de las partículas. Por ejemplo, las mediciones indirectas del flujo de partículas de carbono orgánico utilizando los desequilibrios entre el ^{234}Th y el ^{238}U en la columna de agua contribuyen a una mejor comprensión del cambio ambiental.

Dado que muchos radionucleidos se comportan de modo similar a determinados contaminantes no nucleares, el conocimiento del comportamiento de los contaminantes radiactivos ayuda a menudo a evaluar el transporte y destino final de estos últimos. Las características de la desintegración radiactiva de determinados radionucleidos naturales (por ejemplo, el ^{210}Pb) los convierte en excelentes instrumentos geocronológicos para datar la secuencia de las capas de sedimentos en ciertas zonas marinas. Esto ayuda a establecer el historial de los contaminantes en los sedimentos. De modo semejante, pueden establecerse las tasas de aterramiento de los pantanos de importancia ecológica mediante el examen de los radionucleidos residuales presentes en distintos estratos de núcleos de fangos pantanosos. Los radioisótopos de metales pesados análogos, particularmente emisores gamma, también han demostrado ser útiles para el estudio de los contaminantes provenientes de metales pesados en el agua, los sedimentos y los organismos.

En relación con un número cada vez mayor de floraciones de algas nocivas registrado en las aguas costeras, la reciente utilización de saxotoxinas tritiadas para la producción de patrones de toxinas de algas marinas ha ayudado a los Estados Miembros a desarrollar y emplear técnicas de análisis rápido para medir la toxicidad de los alimentos marinos en que se sospecha la presencia de esas toxinas.

La descarga submarina de aguas subterráneas (SGD) es una vía importante de transporte de contaminantes al mar y un componente principal del suministro de agua dulce a las zonas costeras. También puede provocar una pérdida sustancial de agua dulce en las regiones áridas y limitar la intrusión de agua salada en los acuíferos. Las aplicaciones de trazadores isotópicos estables y radiactivos incluyen la continua vigilancia de ^{222}Rn en las aguas costeras para obtener información sobre los cambios de los flujos de SGD a lo largo del tiempo, y la toma de muestras de agua y sedimentos para los análisis de laboratorio de los isótopos del radio, ^3H , ^{14}C , y los isótopos estables del agua, el helio, el carbono, el nitrógeno y el estroncio. Los principales estudios de la contaminación incluyen análisis de contaminantes provenientes de metales pesados, nutrientes, petróleo y aguas residuales. Los análisis de una gama de contaminantes y trazadores isotópicos en la interfaz acuífero-agua marina permiten realizar estimaciones del flujo integrado de la SGD en las zonas costeras que no se pueden hacer por otros métodos.

Los compuestos marinos antibiovegetativos son los biocidas que se añaden a la pintura marina para evitar el crecimiento y la acumulación de organismos en los cascos de los buques y las estructuras marítimas. Son tóxicos y se utilizan en buques de todos los tamaños propiciando así su dispersión por todo el mundo. Mientras que las técnicas no nucleares proporcionan los medios más viables para determinar las distribuciones de biocidas en el medio marino, las técnicas de radiotrazadores e isótopos estables pueden proporcionar datos experimentales complementarios sobre el comportamiento ambiental y la absorción biológica de componentes antibiovegetativos.

Aunque a veces se consideran costosas, las técnicas analíticas nucleares pueden competir con los métodos no nucleares en aplicaciones específicas, y ciertamente en los casos en que la

financiación del funcionamiento básico de una infraestructura costosa se asegura o se comparte en el marco de programas nacionales. A medida que aumente la demanda de evaluaciones ambientales exactas se fortalecerá probablemente el papel de las técnicas nucleares.

IV-1.2. Medio ambiente terrestre

Entre las técnicas analíticas nucleares que se han utilizado y han demostrado ser sumamente útiles para evaluar y controlar los contaminantes no radiactivos se incluyen el análisis por activación neutrónica; la emisión de rayos X inducida por partículas; la fluorescencia X, la espectrometría de masas; la dilución isotópica y los análisis conexos, y los estudios de radiotrazadores e isótopos estables. Cabe citar como ejemplos los estudios de la contaminación por mercurio, en que las transformaciones entre formas orgánicas e inorgánicas se examinan utilizando una variedad de sus isótopos; el análisis radioquímico por activación neutrónica de oligoelementos a niveles extremadamente bajos, tales como el vanadio en materiales biológicos. En particular, estas técnicas se utilizan con frecuencia para estudiar los efectos para la salud de las partículas en suspensión en el aire en una escala de tamaños de las partículas de 2,5 a 10 micrones.

La utilización de armas nucleares y los ensayos atmosféricos en gran escala de estas armas (1945-1980) han sido hasta ahora las mayores fuentes de radionucleidos antropógenos en el medio ambiente. Los ensayos dieron por resultado la distribución mundial de ^{90}Sr (600 PBq), ^{131}I (650 000 PBq), ^{137}Cs (910 PBq) y muchos otros radionucleidos, incluido el plutonio. Además, accidentes como el de Chernóbil han liberado radionucleidos en pequeñas y grandes proporciones.

Los residuos radiactivos también permanecen de modo directo en los diversos emplazamientos de los ensayos y sus inmediaciones, y se ha emitido radiactividad durante la producción de materiales aptos para armamentos y la fabricación de armas. Las dosis de radiación resultantes para las personas se deben principalmente a la ingestión por medio de alimentos contaminados (^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs) y a la irradiación externa procedente del depósito en el suelo (^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{144}Ce).

Asimismo, la producción de energía mediante combustibles fósiles y centrales nucleares así como las actividades industriales y de minería producen a menudo, intencionalmente o no, emisiones en el medio ambiente de radionucleidos y otros elementos y compuestos contaminantes, ocasionando con frecuencia la preocupación del público por los riesgos que entrañan.

Los radionucleidos provenientes de la precipitación se han utilizado como trazadores para comprender e investigar procesos atmosféricos y ambientales, pero no todos los países tienen laboratorios equipados para realizar las mediciones requeridas. La comprensión del destino final de los contaminantes terrestres con miras a adoptar medidas protectoras exige una evaluación apropiada de los riesgos radiológicos y convencionales, lo que requiere una capacidad para realizar mediciones de muestras representativas y exactas con arreglo a los procedimientos acordados y armonizados internacionalmente, particularmente en los casos de transporte transfronterizo de los contaminantes radiactivos y no radiactivos emitidos. Actualmente se ejecutan proyectos internacionales encaminados a facilitar una red estructurada de laboratorios para la realización de análisis exactos de muestras ambientales de emisiones accidentales de radiactividad, así como a prestar asistencia en la determinación de las concentraciones de radionucleidos en determinados lugares contaminados.

Es preciso elaborar modelos y métodos integrados adecuados para pronosticar el destino final en el medio ambiente y las consecuencias para la salud humana de los contaminantes y/o adaptar esos modelos y métodos a las circunstancias concretas, incluida la cuantificación de la transferencia a alimentos diferentes de los que se consumen habitualmente en Europa occidental. Se deben determinar los parámetros de impulsión, así como las formas en que pueden ser afectados para permitir estrategias de rehabilitación más eficaces y específicas para los emplazamientos, y la gestión después de las emisiones de radionucleidos. Ello contribuirá a la producción de alimentos inocuos que no exceda de los límites de intervención internacionalmente acordados para el consumo y el comercio.

IV-2. REMOCIÓN DE MINAS

Existen aproximadamente 60 millones de minas terrestres abandonadas en más de 70 países. El número estimado de nuevas víctimas de las minas terrestres es de 15 000 a 20 000 por año. El desminado humanitario requiere la remoción completa de todas las minas de modo que la zona despejada pueda volver a utilizarse normalmente. Se calcula que la remoción de minas por medios manuales puede despejar solamente 10 m² diarios por zapador y que por cada 2 000 minas removidas muere un zapador.

Uno de los principales problemas con que tropieza el desminado humanitario es la dificultad para discriminar entre los objetos inofensivos y las minas terrestres. Al aumentarse la sensibilidad de los detectores de metales se logra hacerlos sensibles a los pequeños trozos de chatarra que se encuentran a menudo en las zonas minadas. Como complementos de los métodos manuales corrientes, están surgiendo algunas técnicas avanzadas de detección de minas, tales como el radar de detección subterránea, la termografía infrarroja y los detectores avanzados de metales. Cada una de esas técnicas sólo detecta "anomalías" en el suelo, y no puede determinar la presencia de un agente explosivo. La irradiación de una anomalía detectada con neutrones muy penetrantes permite determinar la presencia de explosivos mediante la detección de la radiación secundaria y/o la retrodispersión de los neutrones utilizados para obtener la información.

Una de las técnicas más prometedoras es el análisis de neutrones térmicos pulsados rápidos (PFTNA), en que se utiliza un pequeño generador de neutrones del que se emiten neutrones en ráfagas que duran unos pocos microsegundos. Aunque actualmente el principio está bien establecido, el centro de interés de las investigaciones consiste en aumentar la sensibilidad para detectar pequeñas cantidades de explosivo, típicas de las minas terrestres antipersonales, a una velocidad razonablemente adecuada. Se están creando diversos dispositivos basados en el PFTNA y la retrodispersión neutrónica, que se ensayarán en condiciones de campo en un futuro próximo, para lo cual el OIEA está ejecutando un proyecto de cooperación técnica en Europa.

IV-3. MEJORA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Numerosas industrias utilizan los radioisótopos y/o las radiaciones en sus procesos de fabricación y para mejorar la calidad de sus productos. Los radioisótopos pueden mitigar la necesidad de desmantelar el equipo y frecuentemente permiten realizar pruebas durante su funcionamiento. La mayor parte de las aplicaciones de este tipo no son destructivas, ni invasivas, y a menudo no hay ninguna opción que las sustituya.

Las principales aplicaciones industriales de los radioisótopos y las radiaciones pueden clasificarse del modo siguiente:

- Aplicaciones de trazadores para obtener información sobre el flujo y el tiempo de residencia en una vasija de proceso, mezcla, etc.
- Aplicaciones de fuentes selladas, en que las fuentes se utilizan para la medición del caudal, control del espesor, la humedad y la densidad, y para ensayos no destructivos, la ubicación de bloqueos en tuberías subterráneas y exploraciones de columnas. Estas mediciones pueden contribuir notablemente a mejorar el proceso y rectificar cualesquiera defectos.
- Tratamiento por irradiación, que es una de las más amplias aplicaciones industriales. Los aceleradores de haces iónicos y de electrones así como los irradiadores de ^{60}Co son importantes en este aspecto.

La utilización de trazadores radiactivos de período corto está muy difundida en las industrias petroquímica, química y de procesamiento de minerales para examinar vasijas de reactores de funcionamiento defectuoso y optimizar los parámetros de los procesos. La relación costo-beneficio es elevada. Por ejemplo, una gran empresa petrolera aumentó su producción de 70 000 barriles diarios (capacidad nominal de 80 000 barriles) a 100 000 barriles diarios. Estudios con radiotrazadores revelaron que el tiempo medio de residencia del agua y el petróleo en la columna de separación constituyó la cuarta parte del valor nominal. Las modificaciones se tradujeron en un aumento diario de 600 000 dólares del valor productivo. Los radiotrazadores se utilizan también con frecuencia para detectar fugas en oleoductos, gasoductos y tuberías de gran longitud dedicados al transporte subterráneo de petróleo, y para diversas otras tareas, como ayudar en los estudios de desentarquinamiento de puertos.

Las fuentes selladas (^{60}Co , ^{192}Ir , etc.) se utilizan ampliamente en los análisis no destructivos de componentes fabricados para detectar fisuras y otros defectos. Las pruebas radiográficas son indispensables para verificar todos los equipos, tuberías y vasijas de reacción fabricados en las industrias modernas, como la automotriz, la naviera, la aérea, la energética y la petroquímica. Las fuentes selladas se emplean también para examinar los bloqueos de tuberías y los reactores de funcionamiento defectuoso en la industria con beneficios comparables a los obtenidos con trazadores.

Los datos de las industrias japonesas (como ejemplo de un país desarrollado) ilustran los usos principales del tratamiento por irradiación. Los tres componentes principales son: el tratamiento de polímeros, la esterilización y la irradiación de alimentos. Los sectores industriales que emplean el tratamiento de polímeros se indican en la Fig. IV-1, conjuntamente con el valor en dólares de dichas industrias para ilustrar más claramente la escala industrial de las operacio-

nes. El tratamiento se realiza principalmente por medio de haces de electrones generados por aceleradores.

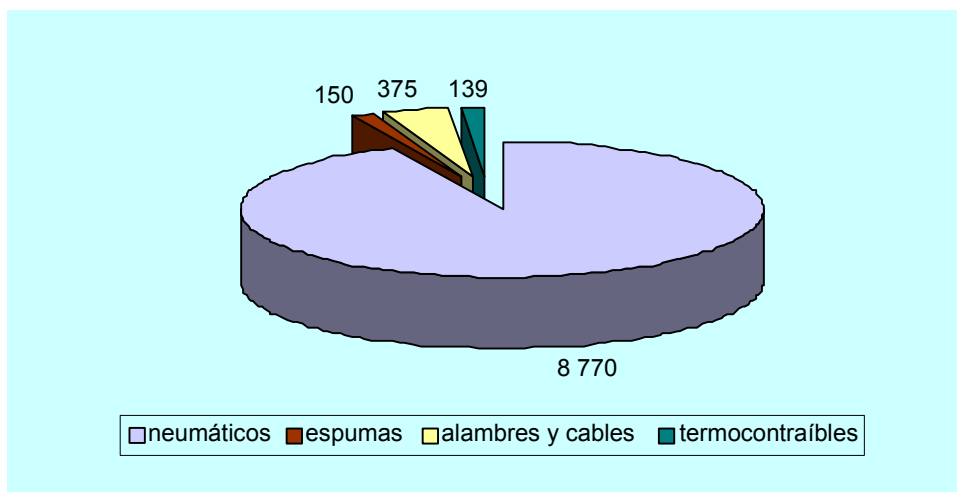


Figura IV-1. Productos industriales principales del tratamiento de polímeros en el Japón (millones de dólares)

Entre otras aplicaciones industriales se incluye la radioesterilización de productos médicos/sanitarios desechables como guantes, jeringas, lentes de contacto y suturas. Se utilizan diversas técnicas y su proporción relativa se indica en la Fig. IV-2. El elemento principal son los irradiadores gamma, basados en ^{60}Co . Los irradiadores de células gamma se utilizan también para irradiar la sangre que se ha de utilizar para transfusiones, particularmente a pacientes debilitados, o en transplantes de médula ósea. Los irradiadores gamma se utilizan también para la esterilización de injertos tisulares. Este proceso está adquiriendo cada vez mayor importancia a medida que los bancos de tejidos del sector comercial y público han reconocido cómo permite que el tejido resultante quede libre de los contaminantes derivados de la esterilización por gas y química.

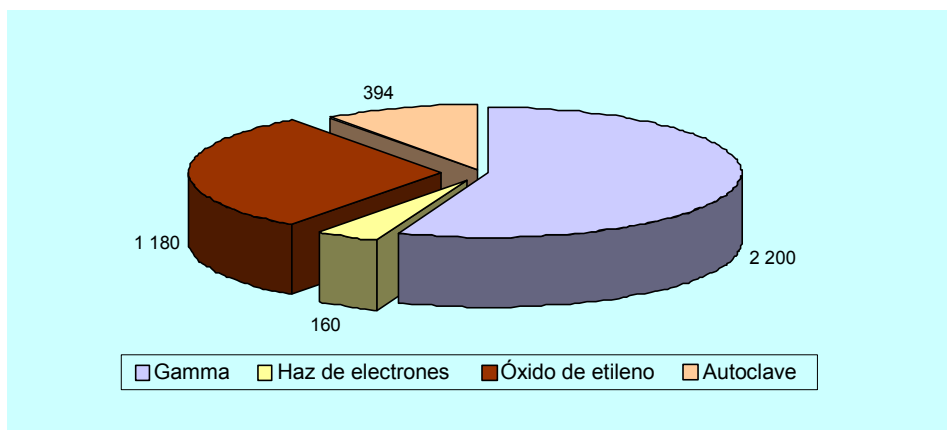


Figura IV-2. Porcentaje de utilización de los distintos métodos de esterilización en el Japón (millones de dólares)

En cuanto a las tendencias futuras, no es probable que las aplicaciones industriales de las radiaciones y los isótopos se reemplacen por otros procesos en un futuro previsible. En el ámbito de la radiografía, los aceleradores o aparatos de rayos X portátiles/transportables de radioisótopos sellados están sustituyendo las fuentes de radiación. El tratamiento por irradiación en las industrias de semiconductores y polímeros es un campo en crecimiento, y entre las nuevas esferas de aplicación se incluyen los polímeros naturales.

Otra esfera prometedora es el empleo de la irradiación en el tratamiento de los efluentes. Actualmente tres centrales eléctricas alimentadas con carbón (de 100 MW(e) de potencia aproximadamente) en China, el Japón y Polonia tienen componentes basados en haces de electrones para extraer los óxidos de azufre y nitrógeno del efluente gaseoso y producir, como subproducto, fertilizante de nitrato de amonio. En Corea se está investigando a escala piloto la posibilidad de tratar por irradiación los efluentes de las aguas residuales procedentes de un complejo químico de producción de colorantes, y está prevista ahora una planta de demostración. Estas experiencias fructíferas deberían tener un impacto positivo en otras industrias que generan aguas residuales portadoras de contaminantes orgánicos.

REFERENCIAS

- [1] Sitio Web del ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. <http://www-nds.iaea.org>.
- [2] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE, Medical and Industrial Uses of Radioactive Materials, Fact Sheet, Washington, D.C. (www.nei.org), julio de 2000.
- [3] MAKKUCHI, K., Radiation Processing in Japan. Resumen de un informe de un grupo de estudio organizado por el Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica, Tokio (1999).
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, base de datos sobre reactores de investigación, (<http://www.iaea.org/worldatom/rrdb>).
- [5] AMALDI, U., The Importance of Particle Accelerators, Europhysics News 31 (6), (2000).
- [6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Report of the Expert Panel on “Evaluation of IAEA Fusion Activities” (2001).
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Summary of ITER Final Design Report, ITER EDA Documentation Series No. 22, Viena (2001).
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, base de datos sobre el Sistema de Información sobre Reactores de Potencia, (<http://www.iaea.org/programmes/a2/>).
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Reference Data Series No. 1*, Viena, julio de 2000 y julio de 2001.
- [10] COMISIÓN EUROPEA, ExternE 1998, Externalities of Energy: New Results, Dirección General XII, Investigación y Desarrollo Científicos, L-2920 Luxemburgo.
- [11] GRUPO INTERGUBERNAMENTAL SOBRE CAMBIOS CLIMÁTICOS: Climate Change 2001: Mitigation. Third Assessment Report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 3, Cambridge University Press, Cambridge, UK (agosto de 2001).
- [12] RIAHI, K., y ROEHRL, R.A., Energy Technology Strategies for Carbon Dioxide Mitigation and Sustainable Development, Environmental Economics and Policy Studies, Vol. 3, Núm. 2, páginas 89 a 124.
- [13] ORGANIZACIÓN DE COOPERACIÓN Y DESARROLLO ECONÓMICOS, Projected Costs of Generating Electricity: Update 1998. OCDE, Organismo Internacional de Energía (OIE) y Agencia para la Energía Nuclear (AEN), París, Francia.
- [14] Clinica’s Complete Guide to Diagnostics Volume 1: Successful Business Strategies for Companies in the Diagnostics Industry, CBS798E, PJB Publications Ltd., enero de 1999.

- [15] TESHIMA, T. y otros, A Comparison of the Structure of Radiation Oncology in the United States and Japan, *Int J Rad Oncol Biol Phys* 34, (1996) 235-242.
- [16] PHILIP, J., Ending Malnutrition by 2020: An Agenda for Change in the Millennium. *Food and Nutrition Bulletin*, Universidad de las Naciones Unidas, Tokio, Vol. 21 (3), suplemento (2000), 88 páginas.