

Conferencia General

GC(49)/INF/3
Fecha 28 de julio de 2005

Distribución general
Español
Original: Inglés

Cuadragésima novena reunión ordinaria

Punto 18 del orden del día provisional
(GC(49)/1)

Examen de la tecnología nuclear — Actualización de 2005

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a peticiones de los Estados Miembros, la Secretaría prepara cada dos años un documento exhaustivo, el *Examen de la tecnología nuclear*, y actualizaciones más breves en los años intermedios. El presente informe es una de esas actualizaciones, en la que se destacan acontecimientos notables ocurridos principalmente en 2004.
- El *Examen de la tecnología nuclear — Actualización de 2005* pasa revista a las siguientes esferas: datos atómicos y nucleares, aplicaciones energéticas, técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación, salud humana, recursos hídricos, medio ambiente marino y terrestre, utilización de reactores de investigación, utilización de aceleradores y supervisión de procesos industriales.
- En el *Informe Anual para 2004* (GC(49/5)), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el *Informe de Cooperación Técnica para 2004* (GC(49)/INF/2) se puede obtener información sobre las actividades del OIEA relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, observaciones concretas de la Junta y otras recibidas de los Estados Miembros.

Examen de la tecnología nuclear – Actualización de 2005

Informe del Director General

Índice

Cuadragésima novena reunión ordinaria	1
Resumen ejecutivo	1
A. Datos atómicos y nucleares	3
B. Aplicaciones energéticas	4
B.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad	4
B.2. El futuro	7
B.2.1. Proyecciones a mediano plazo actualizadas	7
B.2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático	8
B.2.3. Cuestiones actuales	9
B.2.4. Recursos	13
B.2.5. Fisión avanzada y fusión	14
C. Las técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación	15
C.1. Gestión sostenible del suelo y aprovechamiento eficiente del agua	15
C.2. Mejora de los cultivos	16
C.3. Protección de los cultivos	17
C.4. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias	18
C.5. Inocuidad de los alimentos y de los productos agropecuarios	18
D. Salud humana	18
D.1. Nutrición	18
D.2. Medicina nuclear	19
D.3. Radioterapia	19
D.4. Dosimetría y radiofísica médica	20
E. Recursos hídricos	21
F. Medios marinos y terrestres	22
F.1. Medio ambiente marino	22
F.1.1. Detección con radiotrazadores de contaminantes en los alimentos marinos	22
F.1.2. Estudio con trazadores isotópicos del fenómeno El Niño/Oscilación Austral (ENSO)	22
F.1.3. Los desequilibrios en los radionucleidos naturales permiten estudiar los sumideros de carbono en el interior de los océanos	22
F.2. Medio ambiente terrestre	23
F.2.1. Estudios radioecológicos	23
G. Utilización de reactores de investigación	24
H. Utilización de aceleradores	25
I. Vigilancia de los procesos industriales	25
I.1. Tratamiento por irradiación - Nanotecnología	26

Examen de la tecnología nuclear — Actualización de 2005

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. En 2004 se cumple el 50º aniversario del comienzo de la generación de energía nucleoelectrica con fines civiles. Si bien las perspectivas actuales en cuanto a la energía nuclear siguen siendo variadas, no cabe duda de que están aumentando las expectativas. Tanto la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE como el OIEA ajustaron al alza sus proyecciones a mediano plazo relativas a la energía nucleoelectrica. El OIEA proyecta ahora disponer de 423 a 592 GW(e) de energía nucleoelectrica instalada en todo el mundo en 2030, en comparación con 366 GW(e) al final de 2004. Esto se debe al historial de rendimiento de la energía nucleoelectrica, a las crecientes necesidades de energía en el mundo, aparejadas al aumento de los precios del petróleo y el gas natural, a las nuevas restricciones ambientales, incluida la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, a las preocupaciones acerca de la seguridad del suministro de energía en varios países, y a planes de expansión ambiciosos en varios países clave.
2. En Asia se encontraban 18 de los 26 reactores en construcción al final del año, así como 20 de los últimos 30 reactores que se han conectado a la red. Comenzaron los trabajos de excavación para la central Olkiluoto-3 en Finlandia, que será la primera construcción nueva en Europa occidental desde 1991, y Electricité de France seleccionó un emplazamiento en Flamanville para un reactor PWR de demostración europeo, cuya construcción se prevé que comience en 2007. La Comisión Reguladora de los Estados Unidos aprobó otras 11 prórrogas de licencias por un período de 20 años cada una (en total, una licencia de 60 años de vida para cada central). Como parte del programa nucleoelectrico de 2010 del país, el Departamento de Energía de los Estados Unidos está compartiendo los costos con dos consorcios de inversores que preparan las solicitudes para poner a prueba un nuevo proceso simplificado de concesión de licencias.
3. La parte correspondiente a la energía nucleoelectrica en la producción mundial de electricidad se mantuvo constante al 16%, lo que indica que la generación nuclear siguió aumentando por decimotavo año consecutivo al mismo ritmo que el uso mundial total de electricidad. Aunque el número de nuevas centrales conectadas a la red, cinco, se correspondió exactamente con el número de centrales retiradas del servicio, la producción de las nuevas centrales ascendía a 4 785 MW(e) y la de las centrales retiradas a sólo 1 385 MW(e). Además, se volvió a conectar a la red una central abandonada en el Canadá. Sin embargo, sólo se iniciaron dos nuevas construcciones en 2004 y, de conformidad con las políticas en vigor de eliminación gradual de la energía nucleoelectrica, el reactor Obrigheim de Alemania y el Barsebäck-2 de Suecia fueron puestos en régimen de parada en mayo de 2005.
4. Los precios del uranio, que durante los últimos quince años se habían mantenido bajos y estables, siguieron aumentando — de 25 dólares/kg en 2002 a 75 dólares/kg el 29 de junio de 2005. La producción de uranio ha sido considerablemente inferior al consumo durante unos 15 años, y el aumento actual de los precios es reflejo de la percepción cada vez mayor de que las fuentes secundarias, que han cubierto la diferencia, se están agotando.
5. Al final de 2004 se habían clausurado completamente seis centrales nucleares y sus emplazamientos se habían declarado aptos para un uso irrestricto. Diecisiete centrales habían sido parcialmente desmanteladas y cerradas en condiciones de seguridad, 33 se hallaban en fase de desmantelamiento con vistas a declarar el emplazamiento apto para otros usos, y 30 estaban siendo

objeto de un desmantelamiento mínimo antes de su cierre a largo plazo. Una nueva categoría de desecho radiactivo – desechos de actividad muy baja (VLLW) – se ha introducido en algunos países para los desechos radiactivos de actividad muy baja derivados de la clausura que requieren un menor tratamiento especial que los desechos de actividad baja tradicionales y tienen, por lo tanto, un costo de disposición final mucho menor. Un repositorio de VLLW abierto en Morvilliers (Francia) en 2003 entró en 2004 en la fase de pleno funcionamiento.

6. En cuanto a las instalaciones de disposición final de desechos de actividad alta, los mayores progresos se han registrado en los Estados Unidos de América, Finlandia y Suecia. En 2004 se inició en Finlandia la construcción de una instalación subterránea de caracterización para el repositorio final de Olkiluoto. Las investigaciones geológicas detalladas, iniciadas en Suecia en 2002 en dos emplazamientos posibles, están avanzando rápidamente, junto con las consultas públicas. La labor preparatoria en los Estados Unidos de América para la solicitud de una licencia está muy avanzada.

7. Las investigaciones nacionales sobre diseños de reactores avanzados prosiguen en relación con todas las categorías de reactores: sistemas refrigerados por agua, por gas, por metal líquido y sistemas híbridos. Cinco miembros del Foro Internacional de la Generación IV (GIF), iniciado por los Estados Unidos, firmaron en febrero de 2005 un acuerdo marco sobre colaboración internacional en actividades de investigación y desarrollo respecto de sistemas de energía nuclear de la generación IV. Aumentó a 23 el número de miembros del Proyecto internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del OIEA. En el marco de este proyecto se finalizaron diversos estudios de casos en los que se ensayó su metodología de evaluación, y en diciembre se publicó el informe final sobre la metodología del INPRO actualizada.

8. El proyecto del Reactor termonuclear experimental internacional, ITER, dio un paso más con el anuncio el 28 de junio de 2005 por las partes en el ITER – China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Japón, República de Corea y Unión Europea – de que su emplazamiento estará en Cadarache (Francia). El objetivo del ITER es demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la energía de fusión mediante la construcción de una central de fusión que sea funcional. Se prevé que la construcción del ITER se demore ocho años y, a continuación, funcionará por otros 20 años. Se tratará del primer dispositivo del mundo en que una reacción de fusión nuclear controlada generará al menos cinco veces más energía de la que consume. El ITER abrirá nuevos horizontes en el campo de las aplicaciones energéticas de la ciencia y la tecnología nucleares, y se prevén beneficios en muchas otras esferas.

9. Los avances de la tecnología nuclear son rápidos y abarcan muchas esferas de aplicación. Aunque en la presente actualización no se pueden abarcar todos ellos, se abordan determinadas esferas y tendencias claves que se consideran de gran interés para los Estados Miembros del OIEA y que son importantes para ayudar a lograr los objetivos de desarrollo del Milenio y para abordar las cuestiones WEHAB (agua, energía, salud, agricultura y biodiversidad) identificadas en la Cumbre Mundial de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible.

10. El 70% del uso mundial de agua corresponde a la agricultura, por lo que la aplicación de isótopos estables múltiples para evaluar el aprovechamiento eficaz del agua en varios sistemas de cultivo y riego, entre ellos, por ejemplo, las investigaciones sobre la influencia de la planificación del riego en el uso eficaz de fertilizantes, es doblemente ventajosa para el suministro tanto de alimentos como de agua. El mejoramiento genético por inducción de mutaciones para identificar variedades mejoradas de cultivos que sean eficientes en el uso del agua y se adapten al crecimiento en entornos difíciles contribuye a un mayor aprovechamiento de los escasos recursos hídricos. La gestión de esos recursos también se centra cada vez más en la gestión de los acuíferos transfronterizos mediante el uso de instrumentos isotópicos para definir el movimiento del agua, datar el agua y determinar las fuentes de contaminación.

11. En la esfera de la salud humana, los radionucleidos de período corto están ayudando a los especialistas clínicos a estudiar los procesos metabólicos. Una de las técnicas de más rápido desarrollo es la tomografía por emisión de positrones (PET), en la que se utilizan radioisótopos de período ultra corto unidos a marcadores biológicos, que al fusionarse con imágenes computadorizadas de rayos X proporciona un medio aún más potente para vigilar la salud y establecer diagnósticos. Están surgiendo nuevos desafíos en radioterapia con la introducción de técnicas de radioterapia guiada por imágenes,

que tienen la capacidad de rastrear y mantener la exactitud del haz aunque se produzcan cambios en la posición del tumor o del paciente.

12. En el entorno marino, se prevé disponer de nuevos conocimientos sobre el cambio climático a partir de investigaciones en las que se utilizan estudios isotópicos del fenómeno El Niño/Oscilación Austral. Cada vez se reconoce más la capacidad de los océanos para absorber dióxido de carbono y, por consiguiente, su influencia en el clima. Los estudios en que se emplea torio 234, derivado de forma natural del uranio 238 presente en el agua de mar, están ayudando a los oceanógrafos a entender mejor la función de los océanos en este ámbito. La instrumentación nuclear, por ejemplo, los progresos en teledetección mediante el empleo de estudios aéreos con rayos gamma también ayudan a comprender la radioecología del entorno terrestre.

13. Se siguen encontrando nuevos usos para los reactores de investigación y los aceleradores. Los radioisótopos producidos en reactores de investigación se utilizan ampliamente en medicina y en la industria, y los haces de neutrones de los reactores de investigación están facilitando las investigaciones respecto de una amplia gama de aplicaciones que utilizan técnicas de dispersión de neutrones y de radiografía neutrónica. Las técnicas nucleares basadas en aceleradores parecen ser prometedoras para el desarrollo de nuevos materiales, mientras que la espectrometría de masas con aceleradores está despertando el interés en las técnicas de datación con carbono 14, la investigación farmacológica y la vigilancia ambiental.

A. Datos atómicos y nucleares

14. Los datos atómicos y nucleares siguen siendo la base fundamental para la planificación y el diseño de los reactores, las operaciones de las centrales y las mejoras de seguridad, y para facilitar las actividades de clausura en las instalaciones nucleares. Entre los adelantos tecnológicos importantes se cuentan tanto los servicios al cliente de la base de datos nucleares del OIEA como la preparación de mejores bases de datos atómicos y de física nuclear. Los vínculos con otros centros importantes de redes de datos, como el Centro Nacional de Datos Nucleares de los Estados Unidos (NNDC) y la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) siguen siendo sumamente fructíferos. Cada vez se está mejor preparado para atender a las necesidades internacionales de acceso fácil, fiable y que no dependa de la plataforma a datos nucleares de buena calidad, sobre todo gracias al desarrollo de la Internet y de los instrumentos de tecnología de la información.

15. Se consideró que el traslado de las bases de datos nucleares y los servicios del OIEA a otras plataformas de comunicación daría lugar a importantes beneficios. Este esfuerzo conjunto realizado junto con el NNDC llevó a la culminación de la amplia primera etapa a mediados de 2004. Se han puesto a prueba e instalado modernas tecnologías de programas y equipos informáticos para posibilitar enfoques de modernización nuevos y más ambiciosos, lo que se ha traducido en el desarrollo de sistemas de datos nucleares en plataformas múltiples con mayor accesibilidad y fiabilidad para los usuarios finales. Se han determinado otras mejoras, que se propone aplicar en 2005.

16. Los avances continuos en la recopilación y evaluación de datos atómicos y moleculares no sólo apoyan el proyecto del Reactor termonuclear experimental internacional (ITER), sino también otras actividades de investigación y tecnología para el confinamiento inercial de la fusión. Las posibilidades de establecer una cooperación más estrecha y examinar las necesidades de datos en apoyo de las investigaciones sobre la fusión nuclear justifican un énfasis mayor a escala mundial.

17. Las aplicaciones médicas de la radiación están aumentando y, por tanto, para que la planificación del tratamiento sea eficaz y segura y sean óptimos los diseños de las propias instalaciones, será fundamental disponer de datos fiables que garanticen la rentabilidad y amplia disponibilidad de esas aplicaciones. Se requiere un sólido conocimiento de estos datos para la producción óptima de radioisótopos como el flúor 18, el estroncio 82 y el yodo 123 del grado de pureza necesario para su aplicación médica en condiciones de seguridad. Las tasas de incidencia de cáncer y el aumento alarmante que se prevé en los próximos años exigen esfuerzos y estrategias concertados para combatir la enfermedad, y los radiooncólogos y físicos médicos están tratando de obtener por todos los medios

datos atómicos y nucleares de apoyo apropiados con el fin de ayudar a lograr avances en métodos de tratamiento que sean prometedores.

B. Aplicaciones energéticas

B.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad¹

18. Al final de 2004 había en el mundo 440 centrales nucleares en explotación. En el transcurso del año, la energía nucleoelectrica suministró el 16% de la electricidad mundial. Este porcentaje ha sido bastante estable desde 1986, lo que indica que la energía nucleoelectrica ha crecido al mismo ritmo que la electricidad total mundial durante 18 años.

19. El factor de disponibilidad mundial de energía correspondiente a las centrales nucleares pasó del 81% en 2003 al 83% aproximadamente en 2004. A modo de comparación, diez años antes, en 1994, el valor de ese factor correspondiente a las centrales nucleares era del 76%.

20. En el cuadro B-1 se resume la situación de la energía nucleoelectrica en todo el mundo al 31 de diciembre de 2004.

21. En 2004 se conectaron a la red cinco nuevas centrales nucleares (dos en Ucrania y una en China, la Federación de Rusia y el Japón, respectivamente), y se volvió a conectar una central abandonada en el Canadá. Esto se compara con dos nuevas conexiones a la red (y en el Canadá, dos reconexiones) en 2003 y seis nuevas conexiones a la red en 2002.

22. Se pusieron fuera de servicio cinco centrales nucleares en 2004 – cuatro unidades de 50 MW(e) en el Reino Unido y el reactor Ignalina-1 de 1 185 MW(e) en Lituania. Esto se compara con seis retiradas del servicio en 2003 y cuatro en 2002.

23. De acuerdo con la definición del OIEA según la cual la construcción comienza con el hormigonado de los cimientos, en 2004 se inició la construcción de dos centrales nucleares, el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e) de la India y el PWR Tomari-3 de 866 MW(e) del Japón. Además, se reanudó la construcción de dos centrales nucleares de la Federación de Rusia, Kalinin-4 y Balakovo-5, que anteriormente habían sido clasificadas como “construcciones suspendidas”. Asimismo, en Finlandia comenzó la preparación del emplazamiento para la central de Olkiluoto-3 de 1 600 MW(e). En 2003 se había iniciado una construcción, siete en 2002.

24. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazos, se centran en Asia. Como se indica en el cuadro B-1, de 26 reactores en construcción en el mundo² al final de 2004, 17 se encontraban en China, la República de Corea, el Japón o la India. Veinte de los últimos 30 reactores que se han conectado a la red se encontraban en el Lejano Oriente y Asia meridional.

25. En Asia, la capacidad máxima se encuentra en el Japón, con 54 reactores en funcionamiento y tres en construcción. A finales de 2004, la TEPCO había vuelto a poner en servicio 16 de los 17 reactores parados en 2002. Esto elevó al 29,3% la parte correspondiente a la energía nucleoelectrica en la producción de electricidad del Japón en 2004, como se indica en el cuadro B-1, en comparación con el 25% de 2003, si bien siguió siendo inferior al 34% alcanzado en 2002 y 2001.

26. En la República de Corea, con 19 reactores en funcionamiento y uno en construcción en 2004, el 38% de la electricidad total provino de la energía nucleoelectrica.

¹ El OIEA conserva datos sobre reactores en explotación y en régimen de parada, así como sobre los que están en construcción, tal como se describe en el último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA en la dirección <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPES/index.html>. Véase, en particular, el Power Reactor Information System (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>).

² El total incluye también Taiwán (China).

Cuadro B-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2004)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2004		Experiencia operacional total	
	No. de unidades	Total MW(e)	No. de unidades	Total MW(e)	TW h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	18	20 679			158,4	31,8	666	0
ARGENTINA	2	935	1	692	7,3	8,2	52	7
ARMENIA	1	376			2,2	38,8	37	3
BÉLGICA	7	5 801			44,9	55,1	198	7
BRASIL	2	1 901			11,5	3,0	27	2
BULGARIA	4	2 722			15,6	41,6	133	2
CANADÁ	17	12 113			85,3	15,0	509	7
CHINA	9	6 602	2	2 000	47,8	2,2	47	11
COREA, REPÚBLICA DE	19	15 850	1	960	124,0	38,0	239	8
ESLOVAQUIA	6	2 442			15,6	55,2	106	6
ESLOVENIA	1	656			5,2	38,9	23	3
ESPAÑA	9	7 585			60,9	22,9	228	2
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	99 210			788,6	20,0	2 975	8
FEDERACIÓN DE RUSIA	31	21 743	4	3 775	133,0	15,6	791	5
FINLANDIA	4	2 656			21,8	26,6	103	4
FRANCIA	59	63 363			426,8	78,1	1 405	2
HUNGRÍA	4	1 755			11,2	33,8	78	2
INDIA	14	2 550	9	4 092	15,0	2,8	237	5
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL			1	915				
JAPÓN	54	45 468	3	3 237	273,8	29,3	1 176	4
LITUANIA	1	1 185			13,9	72,1	38	6
MÉXICO	2	1 310			10,6	5,2	25	11
PAÍSES BAJOS	1	449			3,6	3,8	60	0
PAKISTÁN	2	425			1,9	2,4	37	10
REINO UNIDO	23	11 852			73,7	19,4	1 354	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 548			26,3	31,2	80	10
RUMANIA	1	655	1	655	5,1	10,1	8	6
SUDÁFRICA	2	1 800			14,3	6,6	40	3
SUECIA	11	9 469			75,0	51,8	322	1
SUIZA	5	3 220			25,4	40,0	148	10
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	81,1	51,1	293	6
Total ^b	440	366 311	26	20 826	2 618,6	16%	11 588	6

a. Los datos proceden del Power Reactor Information System del OIEA (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>)

b. El total incluye los siguientes datos sobre Taiwán (China):

— 6 unidades, 4 884 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2 600 MW(e) en construcción;

— 37,9 TW·h de generación de electricidad mediante energía nuclear, lo que representa el 20,9% del total de electricidad generada en 2004;

— 140 años, 1 mes de experiencia operacional total.

27. En otras zonas de Asia, las contribuciones absolutas y relativas de la energía nucleoelectrica son más pequeñas, pero China y la India en particular prevén una expansión importante. La India, con 14 reactores en funcionamiento al final de 2004, obtenía el 2,8% de su electricidad a partir de la energía nucleoelectrica. No obstante, había otros nueve reactores en construcción, incluido el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e), cuyas obras comenzaron en 2004 en Kalpakkam, y el objetivo actual de la India es suministrar en 2050 el 25% de su electricidad a partir de la energía nucleoelectrica.

28. China, con nueve reactores en funcionamiento al final de 2004, dos en construcción y el 2,2% de su electricidad procedente de la energía nucleoelectrica, tiene previsto ampliar su capacidad a entre 32 y 40 GW(e) para 2020 con el fin de suministrar entre el 4% y el 5% de electricidad. En 2004 el Consejo Estatal de China aprobó oficialmente al menos 7 GW(e) de capacidad más que la que ya está en construcción.

29. Con la conexión de Kalinin-3 a la red en diciembre de 2004 y la reanudación de la construcción de Kalinin-4 y Balakovo-5, la Federación de Rusia tenía 31 reactores en funcionamiento al final del año y cuatro más en construcción. Ucrania, con las conexiones de Khmelnytskyi-2 y Rovno-4 a la red, contaba con 15 reactores en funcionamiento y dos en construcción. Actualmente, la única construcción en Europa oriental es la de Cernavoda-2 en Rumania. Como ya se indicó, Ignalina-1 en Lituania fue retirada del servicio al final de 2004.

30. Europa occidental tenía 137 centrales nucleares en funcionamiento al final de 2004, de 148 en 2001, reducción que se debe fundamentalmente a la retirada de servicio en el Reino Unido de diez unidades de pequeña potencia de los decenios de 1950 y 1960 (ocho unidades de 50 MW(e) y dos de 123 MW(e)). En Europa occidental no se están construyendo centrales nucleares en la actualidad, pero en 2004 comenzaron las obras de excavación para Olkiluoto-3 en Finlandia. Por otra parte, después de la aprobación de la legislación necesaria por el Parlamento francés, Electricité de France seleccionó un emplazamiento para un reactor de agua a presión europeo (EPR) de demostración, cuya construcción se prevé que comenzará en 2007. Estas dos centrales serán los primeros EPR que se construirán. Francia ha comenzado a “sustituir lo nuclear por lo nuclear” en relación con las centrales más antiguas construidas en los decenios de 1970 y 1980. Con respecto al Reino Unido, en el Libro Blanco de 2003 sobre política energética no se propone la construcción de nuevas centrales nucleares, y aducen los gastos que suponen y las cuestiones no resueltas en relación con los desechos, pero deja abierta la opción nuclear por si en algún momento se necesita más potencia nuclear.

31. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) aprobó otras once prórrogas de licencia de 20 años cada una (equivalentes a un total de vida autorizada de 60 años para cada central nuclear), elevando a 30 el número total de prórrogas de licencias aprobadas a finales del año. Aproximadamente tres cuartas partes de las 104 centrales nucleares de los Estados Unidos han recibido, solicitado o declarado su intención de solicitar estas prórrogas de licencia. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) aprobó la prestación de asistencia financiera a dos consorcios industriales para proyectos de demostración de concesión de licencias a centrales nucleares que aprovechan la nueva licencia combinada (COL) de la NRC. Este tipo de asistencia forma parte del programa de energía nucleoelectrica de los Estados Unidos de 2010 destinado a instalar nueva potencia nuclear antes de ese año.

32. En el Canadá, la expansión a corto plazo de la producción de electricidad nuclear se viene realizando mediante la nueva puesta en marcha de todas o algunas de las ocho unidades nucleares (de un total de 22 que existen en el Canadá) que han estado en régimen de parada en los últimos años. Las primeras dos puestas en marcha tuvieron lugar en 2003. La tercera, en Bruce A-3, tuvo lugar en 2004, y las autoridades de la provincia de Ontario han aprobado el plan de producción de electricidad de Ontario para poner en marcha nuevamente la central Pickering A-1.

33. En la América Latina hay dos centrales en funcionamiento respectivamente en la Argentina, el Brasil y México, y una en construcción en la Argentina.

34. En Sudáfrica hay dos centrales en funcionamiento.

B.2. El futuro

B.2.1. Proyecciones a mediano plazo actualizadas³

35. Todos los años el OIEA publica proyecciones de la energía nuclear a mediano plazo actualizadas. Las actualizaciones de 2004 se indican en la figura B-1, junto con un escenario de referencia actualizado de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) de la OCDE titulado *World Energy Outlook 2004*. En la figura, de las tres barras, la de la izquierda representa la proyección baja del OIEA, en la que se supone que no se construirán nuevas centrales nucleares que no sean las que se encuentran en construcción o que están planificadas en firme actualmente, y que las centrales nucleares antiguas se retirarán de servicio conforme al calendario previsto. La proyección baja figura con el sufijo “L”, y muestra el desglose de la producción de electricidad nuclear por regiones.

36. La barra del medio es la proyección alta del OIEA, que incluye nuevos proyectos nucleares previstos y propuestos que se consideran razonables además de los que ya están firmemente en tramitación. Las barras de la proyección alta figuran con el sufijo “H” y también indican el desglose por regiones.

37. Para fines de comparación, la barra de la derecha de cada grupo de tres barras muestra el escenario de referencia actualizado del *World Energy Outlook 2004* de la AIE. El escenario de referencia de la AIE, que se actualiza cada dos años, es un punto de referencia bien conocido y citado con frecuencia en las deliberaciones internacionales sobre políticas y mercados energéticos. Este escenario se construye básicamente partiendo del mismo enfoque que la proyección baja del OIEA. La mayor parte de las diferencias cuantitativas entre las dos barras que se observa en la figura B-1 es resultado de las proyecciones más bajas de la AIE para Europa oriental.

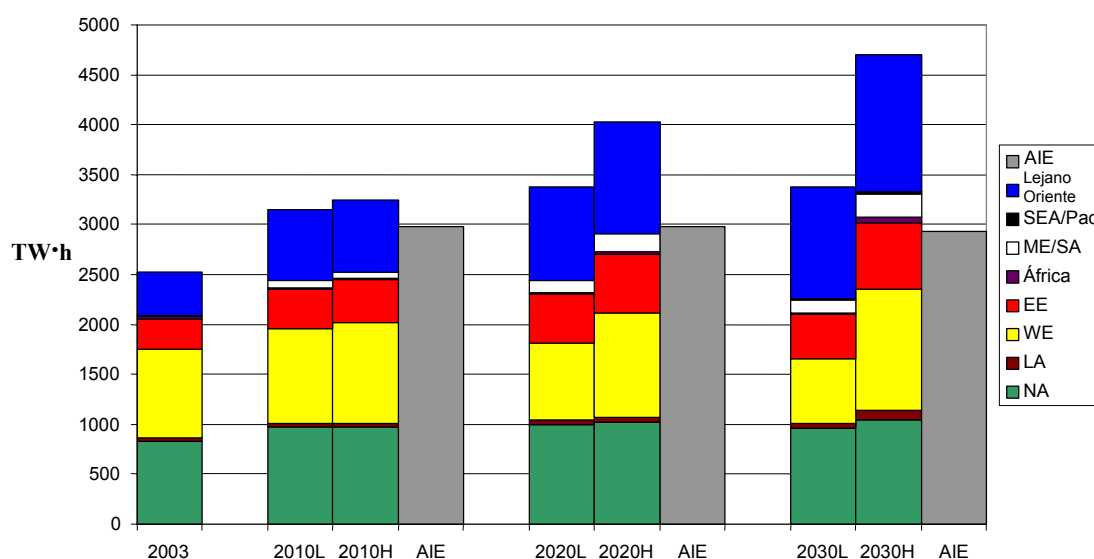


Figura B-1. Producción mundial de electricidad a partir de energía nucleoelectrónica en 2003 y en tres proyecciones hasta 2030 (NA, América del Norte; LA, América Latina; WE, Europa occidental; EE: Europa oriental; ME/SA: Oriente Medio/Asia meridional; SEA/Pac: Sudeste de Asia/Pacífico).

³ Se puede consultar más información sobre las proyecciones recientes del OIEA en la dirección <http://nesisda2/rds-1/>. Las actividades del OIEA actuales y recientes sobre recopilación de datos y evaluación de los expertos en relación con las proyecciones a mediano plazo se describen en el último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en la siguiente dirección del sitio web: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>.

38. En la proyección baja del OIEA se prevé una generación de electricidad nuclear para 2030 de 3 379 TWh, es decir, un aumento del 34% de la producción de electricidad nuclear en relación con 2003. Es significativo que las proyecciones bajas del OIEA hayan sido revisadas al alza todos los años desde 2000. La cifra de 3 378 TWh indicada en la figura B-1 para 2020 es un 60% más alta que el valor de 2020 que el OIEA proyectó en 2000. (Las proyecciones del OIEA en 2000 sólo llegaban a 2020).

39. La proyección alta del OIEA muestra un aumento del 86% en la producción de electricidad nuclear entre 2003 y 2030. Ha habido menos variación, y una pauta de cambio menos constante, en las proyecciones altas de un año a otro. En su conjunto, la evolución de las proyecciones tiene sentido en una industria que tiene perspectivas bastante buenas pero que no crece de forma espectacular. La lista de proyectos razonables a mediano plazo en la proyección alta es bastante estable y todos los años son más los que pasan de la categoría de perspectivas prometedoras a la de proyectos reales en tramitación.

40. En la figura B-1 se observan importantes diferencias entre distintas zonas del mundo. Como se señaló anteriormente, la expansión se centra en el Lejano Oriente, donde se da el máximo crecimiento en todas las proyecciones. Hay una expansión importante en Europa oriental en las proyecciones tanto altas como bajas del OIEA, pero un crecimiento muy modesto en América del Norte. En Europa occidental hay una contracción en la proyección baja en la medida en que las puestas fuera de servicio de las centrales nucleares sobrepasan las nuevas construcciones, pero hay una importante expansión en la proyección alta. Las tasas de crecimiento son altas en el Oriente Medio y Asia meridional en ambas proyecciones del OIEA, aunque la región parte de una base reducida en 2003.

41. Aunque la figura B-1 no muestra el desglose regional en el caso del escenario de referencia de la AIE, que utiliza regiones algo diferentes que el OIEA, la pauta subyacente es en gran medida la misma que en la proyección baja del OIEA: expansión en el Lejano Oriente y Asia meridional, contracción en Europa occidental y estabilidad en América del Norte.

B.2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático⁴

42. A más largo plazo, el futuro de la energía nucleoelectrónica dependerá, entre otras cosas, del grado de eficacia con que ayude a satisfacer las crecientes necesidades mundiales de energía y a mitigar las cargas ambientales asociadas al uso de energía. Con respecto a las crecientes necesidades mundiales de energía, en 2004 no se celebraron deliberaciones internacionales importantes sobre las necesidades de energía para el desarrollo sostenible. La Comisión de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible examinará el tema de la energía en sus períodos de sesiones decimocuarto y decimoquinto en 2006 y 2007.

43. En lo que atañe a la protección ambiental, el principal acontecimiento mundial en 2004 se produjo en noviembre con la ratificación por la Federación de Rusia del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Como resultado de ello, los países del anexo I⁵ que ratificaron el protocolo colectivamente representaron más del 55% de las emisiones de dióxido de carbono consignadas en el anexo 1 de 1990, y el protocolo entró en vigor 90 días más tarde, el 16 de febrero de 2005.

44. La entrada en vigor del Protocolo de Kyoto probablemente tenga poco efecto inmediato en la expansión de la energía nuclear. El protocolo abarca sólo el primer período de compromiso, 2008-2012, y los distintos países han adoptado políticas diversas para cumplir sus límites con respecto al Protocolo de Kyoto. No todas estas políticas benefician la energía nucleoelectrónica, pese a sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) muy bajas: sólo 2 a 6 gramos de carbono por

⁴ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a aspectos del desarrollo sostenible y el cambio climático que guardan relación con la energía en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

⁵ Los países del anexo I son los países miembros de la OCDE en 1992 más los países con economías en transición en esa fecha.

kilovatio-hora para toda la cadena de combustible nuclear, casi lo mismo que la energía eólica y solar. Pero a más largo plazo, se espera que el avance hacia una economía basada en la limitación de emisiones de carbono haga cada vez más atractivo el uso de la energía nucleoelectrica. En el pasado los inversores no veían la ventaja de reducir al mínimo las emisiones de GEI, ya que la ausencia de restricciones o impuestos en relación con estas emisiones hacía que tratar de evitarlas no tuviese ningún valor económico. El Protocolo de Kyoto es hoy la única vía para aplicar restricciones amplias y coordinadas a las emisiones de GEI y, por tanto, constituye un importante paso para lograr que se atribuya un valor económico tangible a las posibilidades de la energía nucleoelectrica para evitar las emisiones de GEI.

B.2.3. Cuestiones actuales

Aspectos económicos

45. Las centrales nucleares actuales en correcto estado de funcionamiento siguen siendo en general una fuente de electricidad competitiva y rentable, como evidencia el constante ritmo de prórrogas de licencias en los Estados Unidos y otros lugares, aunque en estos últimos las prórrogas sean por periodos más breves y más frecuentes o adopten la forma de “prórrogas renovables”.

46. En el caso de las nuevas construcciones, la competitividad de la energía nucleoelectrica depende, entre otras cosas, de los costos de las opciones con las que deba competir, las perspectivas de los inversores, y los mercados de energía y electricidad en los que se producirá esa competitividad. Como se presenta en el cuadro B-2, las estimaciones recientes de los costos de las nuevas centrales nucleares y sus principales competidores muestran márgenes de valores que denotan tecnologías, situaciones de recursos nacionales y perspectivas de los inversores distintas. El intervalo observado en el cuadro B-2 abarca dos estimaciones recientemente notificadas que recogen la experiencia actual. Atomic Energy of Canada Limited ha calculado los costos de terminación de las centrales Qinshan 3-1 y Qinshan 3-2 en Zhejiang (China) en 1 500 dólares por kW(e) (o 1 163 euros por kW(e) tomando como base el tipo de cambio utilizado en el cuadro B-2), y el precio notificado para el EPR de la central Olkiluoto-3 es de 1 920 euros por kW(e).

47. En 2004 se registraron dos importantes tendencias constantes en los mercados de electricidad hacia una liberalización cada vez mayor y la fijación de límites más estrictos respecto de las emisiones de GEI. El mercado de electricidad de los 15 Estados miembros de la Unión Europea (antes de la ampliación de la UE en 2004), por ejemplo, se abrió totalmente a los clientes no domésticos en 2004, y en el Japón el 40% de todo el mercado de electricidad estuvo abierto durante 2004 (en 2005 se aumentará al 60%). Asimismo, en una directiva de la UE publicada en octubre de 2003 se estableció el régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea relativo a las emisiones de dióxido de carbono con efecto a partir del 1 de enero de 2005, y en el curso de 2004 se elaboraron planes nacionales de asignación (PNA) para establecer concesiones iniciales de emisiones para las instalaciones. A finales del año, la Comisión Europea (CE) había finalizado las evaluaciones de 21 PNA. Aprobó sin condiciones 15 de los PNA, aprobó otros 3 con condiciones y “rechazó parcialmente” los 3 restantes.

Cuadro B-2. Comparación de estimaciones de costos a partir de estudios recientes

	MIT ^a	Universidad de Chicago ^b	Real Academia de Ingeniería ^c	DGEMP Francia ^d	METI Japón ^e	CERI Canadá ^f	AEN/AIE ^g
Costo normalizado^h	centavos de euro/kWh ⁱ	centavos de euro/kWh	centavos de euro/kWh	centavos de euro/kWh	centavos de euro/kWh	centavos de euro/kWh	centavos de euro/kWh
nuclear	5,2	3,2-5,5	3,3	2,8	3,8	3,4-5,8	1,6-5,3
carbón	3,3	2,6-3,2	3,6-5,0	3,2-3,4	4,1	3,1-3,8	1,2-5,3
gas natural	2,9-4,3	2,7-3,5	3,1-4,0	3,5	4,5	4,7-4,9	2,9-5,0
petróleo					7,8		
energía hidroeléctrica							3,1-18,8
estiércol de ave de corral			9,7				
viento del mar			5,3-7,7				2,4-11,2
viento terral			7,9-10,3				4,0-9,5
olas/corrientes marinas			9,4				
paneles FV							9,4-145,4
Costo inmediato^j	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)	euros/ kW(e)
nuclear	1 550	930-1395	1 642	1413	2026	1525-1931	832-1 945
carbón	1 008	916-1132	1 042-1 171	1 000-1 100	1975	1040	557-1 819
gas natural	388	388-543	428	505	1191	462	329-1 001
petróleo					1953		
energía hidroeléctrica							1 194-5 413
estiércol de ave de corral			2 628				
viento del mar			1 057				756-1 266
viento terral			1 314				1 269-2 032
olas/corrientes marinas			1 999				
paneles FV							2 606-7 877

- Instituto de Tecnología de Massachussets, *The Future of Nuclear Power*, The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, (EE.UU.), 2003.
- Universidad de Chicago, *The Economic Future of Nuclear Power*, The University of Chicago, Illinois (EE.UU.), 2004.
- Real Academia de Ingeniería, *The Cost of Generating Electricity*, Londres (Reino Unido), 2004.
- Dirección General de Energía y Materias Primas (DGEMP), Ministerio de Economía, Finanzas e Industria de Francia, París (Francia), 2003.
- Ministerio de Economía, Comercio e Industria, Tokio (Japón), 2004.
- Matt Ayres, Morgan MacRae y Melanie Stogran, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison of Alternate Technologies for Baseload Generation in Ontario*, Instituto de Investigaciones Energéticas del Canadá (CERI), Calgary, Alberta, (Canadá), 2004.
- Agencia de Energía Nuclear y Agencia Internacional de la Energía, *Projected Costs of Generating Electricity: 2005 Update*, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, París, 2005.
- El costo normalizado de la electricidad es el precio en barra necesario para sufragar los costos de explotación y los costos de capital anualizados de una central eléctrica.
- Las monedas nacionales utilizadas en los distintos estudios se convirtieron a euros utilizando los tipos de cambio vigentes el 11 de noviembre de 2004.
- El costo inmediato es la cantidad que se pagaría si todos los gastos de capital se produjeran simultáneamente. No incluye cargos por intereses.

Seguridad⁶

48. El intercambio internacional de las experiencias en la explotación de las centrales nucleares y, en particular, la amplia difusión de las “enseñanzas obtenidas” son elementos esenciales para mantener y fortalecer la explotación de esas centrales en condiciones de seguridad. La recopilación, el intercambio y el análisis de la experiencia operacional constituyen elementos fundamentales de la gestión de la seguridad, y hay pruebas empíricas claras de que las lecciones extraídas de la experiencia en la explotación de las centrales nucleares se han traducido, y sigue traduciéndose, en mejoras de la seguridad de las centrales. Las reuniones periódicas del Sistema conjunto OIEA/AEN de Notificación de Incidentes son una parte de este proceso de intercambio mundial, en las que se examinan y analizan en detalle los incidentes recientes.

49. Gracias a este intercambio y análisis de la información, entre otras razones, sigue mejorando el historial general de seguridad de la industria nuclear. Las estadísticas de la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares para 2003 muestran una tasa estable baja de paradas automáticas de emergencia no planificadas de aproximadamente un tercio del nivel registrado a comienzos del decenio de 1990, así como una reducción constante de la tasa ya baja de accidentes industriales.

50. En el *Examen de la seguridad nuclear* que publica anualmente el OIEA se proporciona información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

Clausura, combustible gastado y desechos⁷

51. En lo que a la clausura se refiere, se mantiene la tendencia al desmantelamiento inmediato. En los Estados Unidos de América una de las razones de ello es utilizar los emplazamientos de disposición final de desechos existentes mientras aún estén abiertos y antes de que aumenten los costos. Entre las centrales nucleares que están llegando al final del proceso cabe mencionar las siguientes: Yankee Rowe y Maine Yankee (ambas con el 90% de la clausura concluida al final de 2004 y con la “liberación sin restricciones” prevista para 2005), Big Rock Point (la clausura ha concluido en un 85% y también se prevé la liberación sin restricciones en 2005), Trojan (la clausura ha concluido en un 95% y la terminación de la licencia está prevista para 2005) y Connecticut Yankee (liberación sin restricciones prevista para 2007). Entre las excepciones a la estrategia del desmantelamiento inmediato figuran sobre todo emplazamientos de unidades múltiples en los que el desmantelamiento está previsto para cuando todas las unidades hayan llegado al final de su vida útil.

52. Incluso cuando las estrategias son similares, las razones suelen ser diferentes según las situaciones concretas de las centrales nucleares. En Alemania, por ejemplo, donde también parece preferirse el desmantelamiento inmediato, el proyecto de desmantelamiento inmediato en gran escala del emplazamiento de Greifswald en Alemania oriental (cinco reactores inicialmente en explotación, uno por iniciar la fase de explotación y dos en construcción) facilitó en gran medida la retención del personal clave y el reemplazo del numeroso personal de explotación.

53. Un acontecimiento importante ocurrido recientemente es la introducción de una nueva categoría de desechos radiactivos en algunos países, a saber, los desechos de actividad muy baja (VLLW). En 2003, se abrió en Morvilliers (Francia) un repositorio de VLLW que alcanzó el pleno funcionamiento en 2004. España también está examinando la posibilidad de abrir un repositorio de VLLW. La categoría VLLW tiene por objeto dar cabida a la mayoría de los desechos procedentes de

⁶ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: <http://www-ns.iaea.org/>.

⁷ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la clausura, el combustible gastado y los desechos en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html> y <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>.

las clausuras a un costo de disposición final muy inferior al de los desechos de actividad baja tradicionales.

54. Con respecto al combustible gastado, los inventarios siguen aumentando. Sin embargo, durante decenios el combustible gastado se ha venido almacenando de manera segura en reactores e instalaciones de almacenamiento provisional, y con una moderada 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.

55. En el caso de los desechos de actividad alta, el progreso más notable en las instalaciones de disposición final se ha registrado en los Estados Unidos, Finlandia y Suecia. En Finlandia comenzaron en 2004 las obras de construcción del laboratorio subterráneo de Olkiluoto, que se utilizará para caracterizar la geología local y que, posteriormente, podría incorporarse en el repositorio de disposición final. La construcción del repositorio debería comenzar en 2011, y la explotación en 2020. Suecia ha iniciado investigaciones geológicas minuciosas en dos emplazamientos posibles. La compañía sueca encargada de la gestión del combustible y los desechos nucleares (SKB) espera presentar una propuesta de emplazamiento definitiva hacia 2008. En los Estados Unidos de América, la Planta Piloto para el Aislamiento de Desechos (WIPP) de Nuevo México comenzó a aceptar en 1999 desechos transuránicos de origen militar para su disposición final permanente, y en 2002, el Gobierno estadounidense decidió seguir adelante con la construcción del emplazamiento de disposición final de Yucca Mountain. Está previsto que las operaciones en el emplazamiento de Yucca Mountain comiencen en 2010. El principal acontecimiento en 2004 fue un fallo de los tribunales en el que se dictaminó que el reglamento elaborado por el Organismo de Protección Ambiental para el emplazamiento era menos riguroso de lo que exigía la ley. Si se mantiene la decisión, probablemente será necesario modificar el diseño de la instalación o la legislación.

56. La Ley sobre desechos de combustibles nucleares del Canadá de 2002 establece el plazo de noviembre de 2005 para que la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares (NWMO) de ese país recomiende un enfoque a la gestión del combustible nuclear utilizado. En mayo de 2005, la NWMO publicó proyectos de recomendaciones para su examen y formulación de observaciones en los que proponía un enfoque “escalonado adaptativo” con tres fases. En primer lugar se procedería al almacenamiento in situ del combustible gastado en los reactores durante 30 años aproximadamente. Durante ese tiempo se seleccionaría un emplazamiento para un repositorio centralizado y se construiría un laboratorio de investigación subterráneo. La segunda fase también duraría aproximadamente 30 años. En función de la “dirección social”, durante esta fase se podría trasladar el combustible utilizado al emplazamiento central para su almacenamiento provisional. En la tercera fase, el combustible utilizado se colocaría en el repositorio. Las generaciones futuras decidirían en la fase tres sobre la necesidad y el momento de cerrar el repositorio, así como sobre el tipo de vigilancia posterior a la clausura que se precisaría.

La tecnología nuclear y la no proliferación de las armas nucleares⁸

57. Varios acontecimientos que tuvieron lugar en 2003 y 2004 propiciaron una mayor toma de conciencia internacional respecto del riesgo de proliferación de las armas nucleares asociado con las partes delicadas del ciclo del combustible nuclear. Varias revelaciones sobre actividades no declaradas de enriquecimiento de uranio y reprocesamiento de combustible gastado, así como el descubrimiento de la existencia de un mercado ilícito internacional de tecnologías nucleares de carácter estratégico, pusieron de relieve la necesidad de mejorar los controles sobre estas partes del ciclo del combustible nuclear. En respuesta a esta situación, se han elaborado una serie de propuestas, algunas de ellas formuladas por el Director General del OIEA, para reforzar el régimen de no proliferación nuclear con medidas relacionadas con las salvaguardias fortalecidas, la mejora de la protección física de los materiales y las instalaciones nucleares y el fortalecimiento del sistema de controles de exportaciones nucleares vigente. Además, han proseguido las labores en el marco del INPRO y la Iniciativa de la

⁸ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la resistencia a la proliferación y las salvaguardias en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

Generación IV en lo que respecta al desarrollo de futuras tecnologías nucleoelectricas resistentes a la proliferación.

B.2.4. Recursos⁹

58. Como se indica en la figura B-2, en 2004 continuaron los drásticos aumentos del precio del uranio en dólares que habían comenzado en 2003. Contribuyeron a ello las interrupciones de la producción en varias minas de uranio, el debilitamiento del dólar, y la reducción de los inventarios y suministros secundarios. El precio de entrega inmediata a mediados de 2005 alcanzó los 75 dólares/kg, en comparación con los 40 dólares/kg a principios de 2004. Se prevé que los aumentos de la demanda ejerzan presión sobre los precios a mediano plazo tanto en la proyección alta como la baja del OIEA (Sección B.2.1), y como mínimo hasta 2010 en el escenario de referencia de la AIE.

59. En la última actualización de la edición bienal del “Libro Rojo”, *Uranium 2003: Resources, Production and Demand*, del OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, publicada en 2004, se informa de que en 2002 la producción de uranio fue de 36 042 tU, algo menos que las 37 020 tU producidas en 2001. En 2002, la producción logró satisfacer aproximadamente el 54% de las necesidades mundiales de los reactores (66 815 tU), y se recurrió a fuentes secundarias de suministro, entre ellas, las reservas civiles y militares, el reprocesamiento del uranio y el nuevo enriquecimiento del uranio empobrecido, para atender al resto de las necesidades.

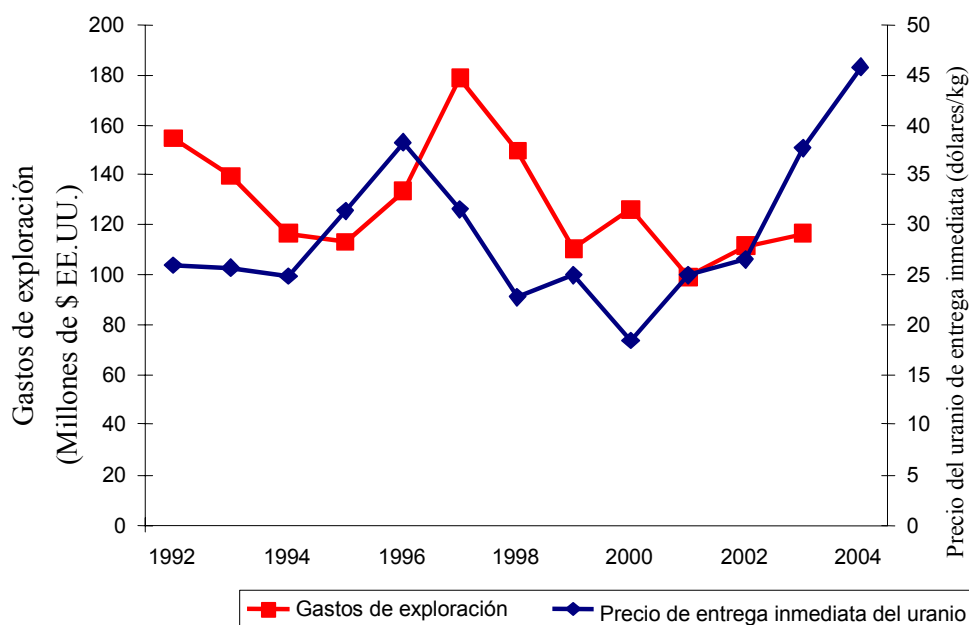


Figura B-2. Precio de mercado y gastos de exploración del uranio, 1992 a 2004.

60. La disminución de la producción de uranio desde principios del decenio de 1990 no obedece exclusivamente a los bajos precios. La aplicación de reglamentos más estrictos y la atención creciente prestada a las cuestiones ambientales han contribuido también a esta disminución. Por ejemplo, en el Canadá, en los decenios de 1940 y 1950, los períodos que transcurrían entre el descubrimiento y la producción eran por lo general de 3 a 10 años. En los años sesenta y setenta la norma era de 11 a 16 años, y en el Libro Rojo de 2003 se observa que a partir de los años ochenta en muchos países han pasado a ser comunes unos plazos de espera del orden de 10 a 20 años.

⁹ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a los recursos nucleares en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_home.html.

61. Históricamente, alrededor de un año después de un incremento de los precios se ha producido normalmente un aumento de la exploración de uranio, como se indica en la Figura B-2. Hay indicios de que estas tendencias se mantendrán, y la línea de los gastos de exploración será claramente más alta en 2004, una vez incluidos todos los datos.

B.2.5. Fisión avanzada y fusión¹⁰

62. En respuesta a las dificultades a que se enfrenta actualmente la energía nucleoelectrónica, que se indican en la sección B.2.3, muchos países están trabajando para mejorar los aspectos económicos, la seguridad, la gestión de desechos y la resistencia a la proliferación de los sistemas avanzados de reactores y del ciclo del combustible. En el caso de los diseños avanzados de centrales nucleares, los esfuerzos se centran en la tarea de simplificar la explotación, inspección, mantenimiento y reparación de las centrales. A corto plazo, es probable que la mayoría de las nuevas centrales nucleares tengan diseños evolutivos basados en sistemas comprobados, y que al mismo tiempo incorporen avances tecnológicos, y en muchos casos economías de escala. A más largo plazo, la atención se centrará en los diseños innovadores, de los cuales varios abarcan la escala de pequeña a mediana potencia (hasta 700 MW(e)). En estos diseños se prevé la construcción con componentes de fabricación industrial, incluidas unidades modulares completas para la instalación rápida en el emplazamiento, lo que creará posibles economías de producción en serie en lugar de economías de escala. Algunos están siendo diseñados para funcionar sin recarga de combustible in situ. Otras ventajas previstas de las unidades más pequeñas son una mayor facilidad de financiamiento, mayor idoneidad para las redes de electricidad pequeñas o las zonas aisladas, y las posibilidades que ofrecen para la calefacción urbana, la desalación del agua de mar y otras aplicaciones no eléctricas. Estos avances deberían aumentar su atractivo para muchos países en desarrollo y algunos países industrializados.

63. En Alemania, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón y la República de Corea se está realizando una importante labor relacionada con el diseño de grandes reactores de agua ligera (LWR) evolutivos. Los principales esfuerzos orientados al diseño de LWR evolutivos de pequeña y mediana potencia se están realizando en China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Francia y el Japón. En la Argentina, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, el Japón y la República de Corea se están elaborando diseños de LWR *innovadores* (es decir, los que incorporan cambios conceptuales radicales en los métodos de diseño o en la configuración de sistemas).

64. Tanto el Canadá como la India están trabajando en diseños avanzados de reactores de agua pesada, y se están elaborando diseños avanzados de reactores refrigerados por gas en Alemania, China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, el Reino Unido y Sudáfrica. En China, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y la República de Corea se están realizando actividades de desarrollo de reactores rápidos refrigerados por metal líquido. En el marco del Foro Internacional de la Generación IV (GIF) y en la Federación de Rusia se están efectuando actividades de desarrollo para sistemas de reactores rápidos refrigerados por metal líquido de aleación de plomo y por metal líquido de sodio y para reactores rápidos refrigerados por gas (helio). Hay investigaciones en curso sobre sistemas híbridos de espectro de neutrones rápidos (por ejemplo, sistemas accionados por aceleradores) en la India, la República de Corea, el Japón, la Federación de Rusia, los Estados Unidos y ocho países de la UE.

65. Dos importantes esfuerzos internacionales complementan las numerosas iniciativas mencionadas anteriormente para promover la innovación: el GIF y el Proyecto Internacional del OIEA sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO). Los miembros del GIF son la Argentina, el Brasil, el Canadá, los Estados Unidos, Francia, el Japón, la República de Corea, el Reino Unido, Sudáfrica, Suiza y la Euratom. El GIF ha examinado una amplia gama de conceptos innovadores, y en 2002 seleccionó seis tipos de sistemas de reactores para la cooperación bilateral y multilateral en el

¹⁰ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la fisión avanzada en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) y en el sitio web del OIEA: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>. También se puede consultar información sobre las actividades del OIEA relativas a la fusión en el último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>).

futuro: el reactor rápido refrigerado por gas, el reactor refrigerado por metal líquido de aleación de plomo, el reactor de sales fundidas, el reactor refrigerado por metal líquido de sodio, el reactor supercrítico refrigerado por agua y el reactor de muy alta temperatura refrigerado por gas.

66. Los miembros del proyecto INPRO del OIEA son: Alemania, Argentina, Armenia, Brasil, Bulgaria, Canadá, Chile, China, España, Francia, Federación de Rusia, India, Indonesia, Marruecos, Países Bajos, Pakistán, República Checa, República de Corea, Sudáfrica, Suiza, Turquía, Ucrania y la Comisión Europea. El INPRO publicó un informe inicial en 2003 en que se explicó a grandes rasgos el potencial de la energía nucleoelectrica y se especificaron directrices y una metodología para evaluar los conceptos innovadores. En 2004 esta metodología fue comprobada mediante aplicaciones experimentales en varios estudios de casos, y en diciembre se publicó un informe final sobre la metodología actualizada del INPRO. La próxima fase del INPRO consiste en facilitar la realización de evaluaciones de los sistemas de energía nuclear innovadores por los Estados Miembros utilizando la metodología del INPRO actualizada, definir y elaborar modelos de implantación de estos sistemas teniendo en cuenta las estrategias examinadas por los Estados Miembros, y determinar posibles marcos y opciones de ejecución para la colaboración en actividades de I+D con vistas al desarrollo de sistemas de energía nuclear innovadores que pudieran ejecutarse durante la fase siguiente.

67. Gran parte de la investigación experimental y teórica actual sobre la fusión nuclear se centra en el reactor termonuclear experimental internacional (ITER). Ha finalizado la fase de las “actividades de diseño detallado de ingeniería” del ITER, y se dio un paso más para hacerlo realidad con el anuncio el 28 de junio de 2005 por las partes en el ITER – China, Estados Unidos, Federación de Rusia, Japón, República de Corea y Unión Europea – de que se construirá en Cadarache (Francia). El objetivo del ITER es demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la energía de fusión mediante la construcción de una central de fusión que sea funcional. La construcción del ITER se demorará unos ocho años y, a continuación, el ITER se explotará durante 20 años. Se tratará del primer dispositivo del mundo en que una reacción de fusión nuclear controlada generará al menos cinco veces más energía de la que consume. El ITER abrirá nuevos horizontes para aplicaciones energéticas de la ciencia y la tecnología nucleares, y se prevén beneficios en muchas otras esferas.

68. También prosiguen las investigaciones en relación con otros métodos de confinamiento magnético, y en el marco de programas nacionales de los Estados Unidos y Francia se está desarrollando intensamente el confinamiento inercial. En 2008 se prevé la finalización de la Instalación nacional de ignición en los Estados Unidos de América. Se puede consultar información sobre las investigaciones patrocinadas por el OIEA relativas a la fusión y a otros temas en la dirección <http://www-crp.iaea.org>, en el informe titulado *Coordinated Research Activities: Annual Report and Statistics for 2004*.

C. Las técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación

C.1. Gestión sostenible del suelo y aprovechamiento eficiente del agua

69. La creciente demanda de alimentos en todo el mundo ha sometido a enormes presiones la sostenibilidad del suelo y de los recursos hídricos y ha hecho que el programa de investigaciones sobre sistemas agrícolas, que antes se limitaba a determinar las formas de aumentar la producción, se concentre ahora en obtener este resultado sin degradar los recursos naturales. Esta evolución del programa de investigaciones ha traído consigo a la vez nuevos retos para la puesta en práctica de las técnicas nucleares existentes y nuevas aplicaciones para enfrentar las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad ambiental. Uno de los principales desafíos es cómo aplicar técnicas nucleares para la conservación del suelo y el agua a niveles más amplios, de ecosistema, cuenca hidrográfica y paisaje, y no simplemente de parcela o campo; otro es cómo determinar los cultivos capaces de aprovechar de manera eficiente los recursos de agua y de nutrientes del suelo y de adaptarse a ambientes difíciles (por ejemplo, de sequía, salinidad o estrés nutricional). Actualmente se está estudiando una amplia variedad de técnicas nucleares para diagnosticar las prácticas no sostenibles y determinar las prácticas

de gestión tanto a escala de las explotaciones agrícolas como a la escala más amplia de los ecosistemas. Estas técnicas incluyen los trazadores isotópicos fósforo 32 y nitrógeno 15, las variaciones en la abundancia natural de isótopos estables (como el carbono 13, el oxígeno 18 y el nitrógeno 15) en el suelo, las plantas y el agua, y los radionucleidos procedentes de precipitaciones radiactivas (cesio 137, plomo 210 y berilio 7). En respuesta a las inquietudes cada vez mayores respecto de la cantidad y la calidad del agua, se están emprendiendo en todo el mundo nuevas iniciativas basadas en los adelantos recientes en el uso de isótopos estables múltiples (hidrógeno 2, oxígeno 18, carbono 13 y nitrógeno 15) para evaluar la eficiencia en el uso del agua en varios sistemas de cultivo y de riego. Entre ellas figurarán iniciativas relacionadas con la influencia de la planificación del riego en la eficiencia del uso de fertilizantes, la reutilización eficiente de las aguas residuales agrícolas como fuente de agua y nutrientes para la productividad de los cultivos, y la importancia relativa de distintas fuentes de contaminantes procedentes de tierras agrícolas en las escorrentías. Los isótopos antes mencionados, junto con el empleo de trazadores no isotópicos y de sondas neutrónicas de humedad deberían proporcionar información que ayude a desarrollar instrumentos de gestión agrícola para aumentar la eficiencia en el uso del agua y los sistemas agrícolas sostenibles tanto en la agricultura de secano como en la de regadío, mediante un mejor conocimiento de las relaciones entre el suelo, las plantas y el agua.

C.2. Mejora de los cultivos

70. La inducción de mutaciones aparejada con la selección sigue siendo la forma más “limpia” y económica de crear variedades modificando características particulares sin tocar el fenotipo general. Las controversias que se centran en los posibles peligros y riesgos de la distribución y el consumo de organismos genéticamente modificados están haciendo que en muchos países se debata si ha de autorizarse o no la producción de cultivos genéticamente modificados y el consumo de estos productos. En este contexto, tanto las empresas comerciales como el sector público están mostrando un renovado interés en las técnicas de inducción de mutaciones como alternativa de las técnicas transgénicas. Más del 60 por ciento de las variedades mutantes se distribuyeron después de 1985, en la era de la transgenia en el mejoramiento fitogenético (el 89 por ciento de las variedades mutantes distribuidas oficialmente son variedades mutantes radioinducidas). Esto se debe también a los importantes éxitos económicos del mejoramiento genético por mutagénesis alcanzados en los Estados Unidos de América (arroz, cebada, girasol, toronja, menta); el Pakistán (algodón); la India (frijol urd); Australia y el Canadá (linaza); el Japón (peras); y China y Australia (arroz).

71. Otra tendencia importante es el aumento de la privatización de las investigaciones en los programas de mejoramiento genético por inducción de mutaciones, no sólo en el caso de las plantas ornamentales sino también en el de cultivos industriales, comerciales y alimenticios. Prueba de ello es el incremento del número de consultas a la base de datos pública FAO/OIEA sobre variedades mutantes (MVD) y a la base de datos y repositorio de germoplasma mutante (MGR) FAO/OIEA. La información sobre los protocolos utilizados para inducir mutaciones en distintos cultivos ha adquirido un carácter cada vez más reservado (secreto comercial) y es menos la información sobre el origen mutante de las variedades a la que tiene acceso el público (véase la Fig. C-1).

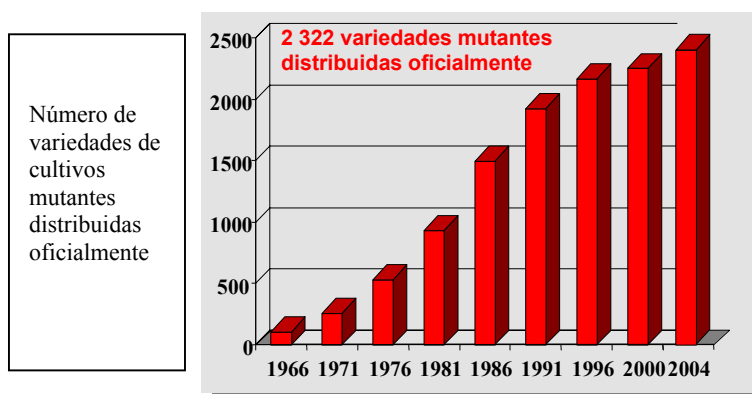


Figura C-1. Número acumulado de variedades distribuidas oficialmente en la MVD. Información recibida de autoridades nacionales oficiales de Estados Miembros de la FAO y el OIEA.

72. Es difícil predecir de qué se dispondrá en el futuro, o qué será importante, y las probables consecuencias de ello, pero los últimos adelantos en la biotecnología - en particular en la comprensión de la estructura y función de los genomas de plantas - confirma que la inducción de mutaciones es uno de los instrumentos más eficientes y rentables para los proyectos de genómica funcional que tienen por objeto el descubrimiento de genes y de sus funciones. Cada vez es más urgente la necesidad de organizar amplias colecciones de variedades mutantes para la investigación de los mecanismos básicos de desarrollo, bioquímicos y fisiológicos, que culminen en el establecimiento de redes de mutaciones (colecciones de mutantes perfectamente caracterizados y seleccionados, organizados de manera tal que permitan realizar análisis de alto rendimiento) para la genómica funcional. Las tecnologías de alto rendimiento y las metodologías de la genómica funcional permitirán analizar desde nuevas perspectivas aspectos fundamentales y aplicados de la biología. De la visión estática de las huellas genéticas se pasará a la visión dinámica de la determinación de perfiles del transcriptoma (todos los genes expresados). Las técnicas nucleares están fomentando cada vez más este cambio de paradigma al producir los recursos mutantes básicos y necesarios.

C.3. Protección de los cultivos

73. Está aumentando el interés de las empresas comerciales en la producción en masa de insectos estériles para la aplicación integrada de la técnica de los insectos estériles (TIE), especialmente con miras a luchar contra las plagas de mosca de la fruta, y en particular de la mosca mediterránea de la fruta. Antes, la TIE se utilizaba principalmente para erradicar plagas clave de insectos a escala local, lo que no daba lugar a una demanda previsible y continua de insectos estériles. Sin embargo, al menos en el caso de la mosca mediterránea de la fruta, la TIE ha pasado a ser una tecnología rentable. Como resultado, la TIE se está utilizando más para la eliminación rutinaria que para la erradicación de poblaciones plaga, lo que se traduce en una demanda continua de moscamed esterilizadas y, de este modo, facilita la comercialización de la TIE para la mosca mediterránea de la fruta.

74. Esta evolución plantea varias cuestiones jurídicas y de propiedad intelectual relativas a la tecnología de la TIE, tanto la que se está utilizando como la que se está desarrollando. En el pasado, eran principalmente los gobiernos los que intervenían directamente en la producción y suelta de los insectos estériles y compartían esta tecnología voluntariamente, por lo que, en general, esas cuestiones no se planteaban. Por ejemplo, una de las tecnologías más importantes ha sido la introducción de cepas de sexaje genético, como las cepas mortales sensibles a la temperatura de machos de moscamed, en los programas de la TIE. Estas cepas de machos se utilizan actualmente en todos los países en que se aplican programas de la TIE para combatir la moscamed, y aún están por definir las condiciones para su transferencia o la concesión de licencias a empresas privadas.

75. El uso de insectos estériles en lugar de insecticidas para eliminar plagas clave contribuye a la supervivencia de los agentes de control biológico y a su eficacia para controlar problemas secundarios relacionados con las plagas, por lo que incide positivamente en la demanda de esos agentes. Se estima que sólo en la cuenca del Mediterráneo la demanda potencial de mosca mediterránea de la fruta estéril asciende a 4 000 millones de machos estériles como mínimo por semana, cifra que se acerca al número total producido actualmente a escala mundial. En esta región, se están construyendo instalaciones de cría en masa en Israel y en España para hacer frente a parte de esta demanda.

76. En la Argentina, un programa integrado de la TIE en zonas amplias para combatir la mosca mediterránea de la fruta ha culminado recientemente, tras diez años, en el reconocimiento oficial por Chile de que importantes zonas de producción comercial de frutas en la provincia de Mendoza están “libres de la moscamed”. Esto permitirá que los productos agrícolas pasen directamente por Chile hasta los puertos del Océano Pacífico para su exportación a los mercados de fruta fresca de los países de la costa del Pacífico.

77. Los recientes adelantos en la capacidad para crear cepas transgénicas de insectos nocivos brindan la posibilidad de utilizar enfoques moleculares para la mejora de las cepas utilizadas en la TIE. Actualmente, varias universidades y organizaciones de investigación están evaluando y caracterizando en laboratorios seguros varias de esas cepas con caracteres beneficiosos. No obstante, su utilización, incluso como insectos estériles, requiere una mayor evaluación de los riesgos y un marco reglamentario, por lo que no es de prever en un futuro próximo.

C.4. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias

78. Las principales actividades dentro de las investigaciones pecuarias guardan relación con el empleo de métodos moleculares y genéticos para entender y manipular los genomas. A pesar del creciente uso de métodos no radiactivos, se siguen utilizando ampliamente los radioisótopos en esas actividades.

79. En el informe del reciente Simposio Internacional de la FAO/OIEA sobre aplicaciones de las tecnologías basadas en genes para mejorar la producción y sanidad pecuarias en los países en desarrollo (véase la dirección <http://www.iaea.org/programmes/nafa/d3/mtc/final-report-int-symposium.pdf>) se destacan las posibilidades de utilizar tecnologías nucleares en beneficio de los agricultores de los países en desarrollo.

C.5. Inocuidad de los alimentos y de los productos agropecuarios

80. El sector privado utiliza cada vez más la irradiación y otras técnicas nucleares para garantizar la inocuidad de los alimentos y reducir al mínimo los riesgos químico, biológico y físico, así como para facilitar el comercio nacional e internacional. Esta demanda creciente está relacionada con los sistemas agrícolas integrados para la producción, el procesamiento y el control higiénico de productos agropecuarios e incluye la gestión de los riesgos ambientales. Se prevé que los gobiernos se centren cada vez más en el control de los peligros relacionados con la inocuidad de los alimentos, desde el momento en que surgen, en el caso de productos de particular interés para sus electores, como las frutas y hortalizas frescas, la carne y los productos cárnicos y los productos lácteos. También se prevé que, aunque se haya demostrado que los alimentos irradiados son inocuos y sanos, las impresiones negativas de los consumidores y su no aceptación de la irradiación de los alimentos sigan obstaculizando su aplicación, por lo que se precisan programas de capacitación y educación, así como información sobre las ventajas de la tecnología a fin de fomentar un mayor uso de ella por la industria alimentaria.

D. Salud humana

D.1. Nutrición

81. Se considera cada vez más que el empleo de la tecnología isotópica es más adecuado y exacto que los métodos convencionales para la elaboración y evaluación de programas nutricionales. El uso de trazadores isotópicos se recomienda como técnica rentable para evaluar la asimilación y absorción de minerales y vitaminas de alimentos enriquecidos. Las técnicas de dilución isotópica se pueden utilizar para verificar los cambios de la composición corporal en casos de obesidad, de malnutrición proteoenergética o en pacientes con VIH/SIDA o cáncer. Esas técnicas utilizan deuterio u oxígeno 18.

82. También se reconoce que la información exacta sobre las necesidades energéticas constituye una valiosa contribución a las estrategias sobre gestión de la atención sanitaria de la población. El método del agua doblemente marcada con deuterio y oxígeno 18 es actualmente la técnica estándar aceptada que se utiliza en la medición del consumo de energía, a partir del cual se pueden calcular los requisitos energéticos de la población en diferentes circunstancias.

83. También ha adquirido importancia la evaluación de la composición corporal, que repercute en la salud o el desarrollo de enfermedades. Una técnica prometedora para la medición de la composición corporal es la técnica de absorciometría de rayos X de energía dual (DEXA) que, aunque en un principio se desarrolló para medir la densidad mineral ósea, actualmente se considera una herramienta precisa para determinar la distribución bruta y regional de la grasa.

D.2. Medicina nuclear

84. Los estudios que emplean radionucleidos de período corto con técnicas de medicina nuclear ayudan a los especialistas clínicos a examinar los procesos metabólicos de los pacientes. El metabolismo normal siempre se ve afectado por las enfermedades, y los cambios suelen darse antes de la aparición de alteraciones anatómicas que se puedan reconocer con técnicas clásicas de obtención de imágenes por rayos X. Así pues, la detección temprana de los cambios del metabolismo puede ser una base mejor para las intervenciones médicas o quirúrgicas. Los protocolos normalizados que se basan en esos estudios y que han sido elaborados para pacientes con problemas cardíacos o cáncer se utilizan cada vez más para optimizar la gestión clínica y, en última instancia, el resultado final del tratamiento. Esto ha sido posible gracias a la tomografía por emisión de positrones (PET), que es una de las técnicas de medicina nuclear de más rápido crecimiento. La PET se está convirtiendo en una aplicación clínica estándar de la medicina nuclear, y utiliza radioisótopos de período ultra corto unidos a marcadores biológicos. En particular, con el uso de la glucosa radiomarcada conocida como FDG (fluorodeoxiglucosa F 18) o colina C 11, se puede estudiar el metabolismo de la glucosa y los aminoácidos en los órganos. A continuación se fusionan las imágenes funcionales de PET con las de la tomografía computadorizada por rayos X, lo cual proporciona información detallada sobre los cambios en la salud de cada paciente y puede ayudar, por lo tanto, a mejorar el control del cáncer. A diferencia de lo que ha ocurrido con la tomografía computadorizada por emisión de fotón único (SPECT), que es la técnica de obtención de imágenes en vivo más utilizada en medicina nuclear, se necesitará tiempo para implantar la PET en los países en desarrollo debido a su elevado costo actual.

85. Existen numerosos procedimientos radioisotópicos in vitro para determinar genotipos y establecer perfiles moleculares aplicables a la biología molecular clínica. Estos procedimientos están adquiriendo cada vez más importancia en varios estados clínicos y preclínicos, desde la determinación de cambios en las células cancerosas hasta la resistencia a los medicamentos de los parásitos de la malaria y en la tuberculosis.

86. Además del tratamiento bien establecido de la tirotoxicosis y el cáncer de tiroides, el principal adelanto en la aplicación de terapias de medicina nuclear es la disponibilidad de anticuerpos monoclonales radiomarcados y de péptidos radiomarcados para tratar enfermedades como los linfomas y los tumores neuroendocrinos. Esto dará lugar a terapias selectivas aplicables a determinados tipos de cáncer con bastantes menos efectos secundarios que la quimioterapia convencional. También se dispone de diversos radiofármacos para aliviar los dolores en casos de cáncer avanzados, lo que mejora de forma eficaz y económica la calidad de vida de los pacientes con metástasis óseas y los libera de la necesidad de someterse a diario al tratamiento con medicamentos opiáceos y otros fármacos costosos.

D.3. Radioterapia

87. El adelanto más importante en el campo de la radioterapia en los últimos años ha sido el descubrimiento, mediante varios ensayos clínicos de alta calidad, de que la adición de agentes farmacéuticos a la radioterapia aumenta el índice de supervivencia de los pacientes en el caso de muchos cánceres comunes, como por ejemplo el de pulmón, cuello uterino, mama, cabeza y cuello, estómago, recto, cerebro y próstata. Sin embargo, en algunos casos la consecuencia es una mayor toxicidad. Prosiguen las investigaciones para tratar de modificar los agentes farmacéuticos y sus blancos de manera que se conserve su efecto radiosensibilizador en los tejidos cancerosos y se reduzca la toxicidad para los tejidos sanos. El OIEA está fomentando las investigaciones sobre el control de la toxicidad retrasada de los modificadores químicos de los efectos de las radiaciones, así como la determinación de blancos moleculares que ayudan a que las células cancerosas no mueran después de su irradiación, y de blancos causantes de las radiolesiones en los tejidos sanos.

88. Durante muchos años se ha aplicado el tratamiento de radioterapia cinco veces por semana como práctica estándar. Algunos estudios recientes han demostrado que la aplicación de este tratamiento más de cinco veces por semana (radioterapia acelerada) puede aumentar el control del tumor en algunos tipos de cáncer sin que la toxicidad aumente de forma significativa. El OIEA está promoviendo las investigaciones en este ámbito.

89. Los adelantos tecnológicos, como la radioterapia con intensidad modulada (IMRT), la radioterapia con protones y partículas pesadas, y la tomoterapia, que permite el tratamiento conformado de un tumor con imágenes en línea durante el tratamiento, posibilitan el aumento de la dosis física administrada al “volumen blanco” canceroso sin que aumente la dosis que reciben los órganos sanos fuera de este volumen. Aunque actualmente estas tecnologías son caras, sus costos pueden reducirse si se aprovecha la distribución mejorada de las dosis físicas aplicando el tratamiento en menos sesiones (hipofraccionamiento) que durante la radioterapia tradicional.

D.4. Dosimetría y radiofísica médica

90. La garantía de calidad en medicina radiológica ayuda a garantizar su aplicación segura y eficaz. La introducción de técnicas de tratamiento nuevas y complejas ha dado lugar a un aumento de la demanda de dosimetría exacta. Aun con el aumento de la complejidad de los tratamientos, la exactitud de la calibración de los haces sigue siendo crucial. Actualmente, la tendencia mundial en lo que respecta a la dosimetría en radioterapia consiste en la aplicación de códigos de práctica de dosimetría basados en la calibración en términos de dosis absorbida en agua, como el código de práctica internacional del OIEA titulado *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy* (Colección de Informes Técnicos, n° 398). Si bien en la radiología de diagnóstico la dosimetría no ha alcanzado aún el mismo nivel de normalización que en la radioterapia, sigue siendo importante para garantizar la seguridad de los pacientes. El OIEA y la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas están elaborando un código de práctica internacional sobre dosimetría en esta esfera.

91. La utilización de los datos de los pacientes en la planificación individualizada de los tratamientos de medicina nuclear terapéutica está adquiriendo importancia, en particular en el caso de los pacientes de pediatría. La planificación exacta del tratamiento requiere un enfoque normalizado para medir los parámetros físicos y biológicos necesarios del paciente y aplicar esos datos a los modelos apropiados. El OIEA está trabajando para elaborar códigos de práctica que aborden los componentes del proceso relativos a la obtención de imágenes y la medición de la radiactividad.

92. Uno de los nuevos retos en radiofísica médica se deriva de la evolución de la radioterapia tridimensional conformada hacia la radioterapia guiada por imágenes (IGRT), que tiene la capacidad de rastrear y mantener la exactitud del haz aunque se produzcan cambios en la posición del tumor o en la anatomía del paciente. El objetivo del IGRT es mejorar los resultados clínicos administrando dosis mayores al tumor con márgenes de tratamiento reducidos, sin afectar a los órganos en peligro y protegiendo los tejidos normales. La IGRT tiene en cuenta los cambios anatómicos, los movimientos de los órganos y los cambios de tamaño y posición del tumor en la preparación del plan de tratamiento, y vigila esos cambios durante el tratamiento. También aprovecha los adelantos recientes en materia de elaboración de imágenes para radioterapia, como la fusión de imágenes de RM-TC (resonancia magnética-tomografía computadorizada) o la grabación de imágenes de PET-TC, así como la TC 4D y la TC de rayo cónico, actualmente disponibles en las salas de tratamiento modernas. Para la verificación de la aplicación del tratamiento se obtienen numerosas imágenes portal múltiple mediante dispositivos electrónicos de obtención de imágenes portal (EPID), que verifican la posición del paciente y trazan gráficos de las dosis administradas.

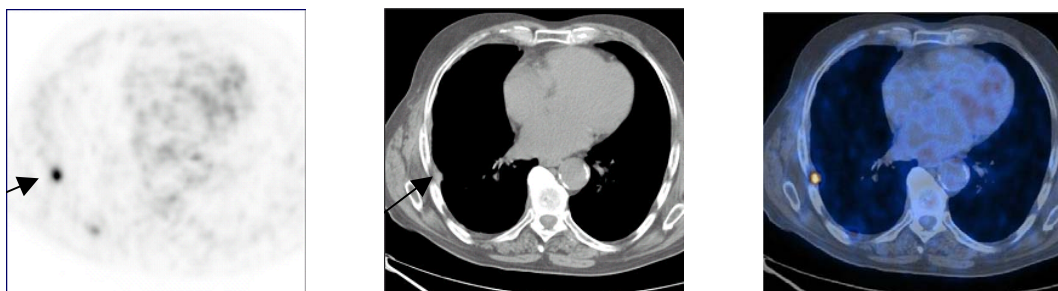


Figura D-1. Obtención multimodal de imágenes (fusión de imágenes): Mejora del diagnóstico del cáncer (determinación de la fase) mediante la fusión de imágenes de PET (izquierda) y TC (centro). La foto de la derecha es la imagen combinada (fusionada), que señala el lugar anatómico preciso del depósito del tumor, apenas apreciable en la imagen de TC sola. (Imagen cedida por el Dr. S. Fanti, Universidad de Boloña (Italia))

93. Las auditorías en radioterapia constituyen un medio importante para garantizar la calidad adecuada del proceso con técnicas tanto tradicionales como modernas. La tendencia actual consiste en ampliar las auditorías que se ocupan de aspectos relativos a la física de modo que se conviertan en exámenes globales realizados por equipos de auditoría multidisciplinarios. Al mismo tiempo, se están elaborando nuevos métodos de auditoría para la dosimetría en radioterapia a fin de mantenerse al día de los progresos recientes de las tecnologías de radioterapia.

E. Recursos hídricos

94. La gestión de los recursos hídricos sigue siendo un aspecto importante del programa internacional. Las Naciones Unidas han proclamado el período 2005-2015 Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida”, en reconocimiento del vínculo fundamental que existe entre el agua y el desarrollo. La tendencia a utilizar el agua subterránea para satisfacer la creciente demanda de agua se está acentuando, debido principalmente a que la disponibilidad de agua de superficie no es ilimitada. Las técnicas isotópicas se utilizan cada vez más para lograr una gestión sostenible del agua subterránea, en particular para entender ciertos aspectos del ciclo hidrológico, como el origen del agua, los ritmos de recarga y los flujos de agua, información que es necesaria para la adopción de decisiones de gestión acertadas.

95. En vista del aumento de la utilización del agua subterránea para atender las crecientes necesidades de recursos hídricos, algunas organizaciones internacionales, entre ellas el OIEA, están elaborando una “visión mundial del agua subterránea”, con vistas a presentarla en el Cuarto Foro Mundial del Agua, que tendrá lugar en México en 2006. Esta visión, que se propone servir de plan maestro para la gestión eficaz del agua subterránea, comprenderá directrices sobre la utilización apropiada de la ciencia y la tecnología, por ejemplo de la hidrología isotópica, para esa gestión.

96. La atención se está concentrando cada vez más en la gestión de los acuíferos transfronterizos. En un inventario del agua efectuado recientemente a escala mundial se identificaron más de 400 de esos acuíferos “compartidos”. El Fondo para el Medio Ambiente Mundial, el Banco Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el OIEA y otras entidades, conscientes del potencial de conflictos que encierran los recursos hídricos compartidos, han comenzado a respaldar proyectos para facilitar una gestión conjunta efectiva. Los instrumentos isotópicos que permiten establecer los riesgos de contaminación, definir el movimiento del agua, datar el agua y determinar las fuentes de contaminación se están imponiendo como herramientas fundamentales para la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas y la elaboración de enfoques para una gestión sostenible de los recursos freáticos.

F. Medios marinos y terrestres

F.1. Medio ambiente marino

F.1.1. Detección con radiotrazadores de contaminantes en los alimentos marinos

97. Las aplicaciones de las tecnologías nucleares que emplean radiotrazadores para evaluar y vigilar la presencia de contaminantes de origen terrestre en las pesquerías costeras se están convirtiendo en herramientas cada vez más importantes para la salud y el comercio. En la gestión de la toxicidad de los alimentos marinos en lo que respecta a las floraciones de algas nocivas (HAB), problema que va en aumento en todo el mundo, se utiliza, por ejemplo, un análisis nuclear receptor-ligando (RBA) en apoyo de una regulación más eficiente de las toxinas parálíticas de los mariscos que se derivan de las HAB. La probable reducción en el futuro de los niveles aceptables de determinadas toxinas en los mariscos requerirá el uso de análisis más sensibles, como el RBA.

98. Las técnicas de radiotrazadores son muy útiles también para combatir los problemas de los contaminantes metálicos de origen terrestre en los entornos costeros. Para entender los efectos y las vías de exposición de los metales procedentes de las actividades de extracción minera en determinadas especies marinas pueden utilizarse radiotrazadores como el níquel 63, el cobalto 57, el manganeso 54, el cadmio 109, el zinc 65 y la plata 110m. Estos radiotrazadores se están estudiando también para evaluar su eficacia como indicadores de contaminación en apoyo de las industrias pesqueras. De la misma manera, en la instalación experimental de radioecología del Laboratorio para el Medio Ambiente Marino de Mónaco se ha evaluado, mediante el radiotrazador arsénico 73, la capacidad de los contaminantes a base de arsénico de acumularse en las pesquerías locales. Entre las tendencias futuras cabe mencionar la aplicación de las tecnologías nucleares de obtención de imágenes a los organismos marinos, y el uso de datos sobre los contaminantes obtenidos en experimentos y sobre el terreno para efectuar evaluaciones del riesgo de probables efectos en las pesquerías y los consumidores.

F.1.2. Estudio con trazadores isotópicos del fenómeno El Niño/Oscilación Austral (ENSO)

99. El impacto del fenómeno ENSO en el medio ambiente marino y en el clima de la Tierra se considera un factor ambiental de la máxima importancia, que afecta al clima de la región del Pacífico y al de toda la Tierra, con consecuencias importantes para las poblaciones ícticas y las precipitaciones, incluida la formación de ciclones. Nuevos estudios isotópicos del fenómeno ENSO han revelado que durante un episodio de El Niño la temperatura de la superficie del mar aumenta y se acompaña de mayores pérdidas por evaporación y de fraccionamiento isotópico. Ello se traduce en cambios en la composición isotópica del agua del mar que afectan al hidrógeno 2, el carbono 13, el carbono 14 y el oxígeno 18. Se ha observado que los corales contienen un registro isotópico en sus bandas de crecimiento anual y pueden, por lo tanto, utilizarse para reconstruir los registros de temperatura del mar del pasado, una vez establecida una cronología absoluta de su crecimiento, lo que podría lograrse mediante una datación independiente de las bandas del coral con radionucleidos, empleando métodos de datación basados en el torio/uranio.

100. Con ayuda de los corales datados, oceanógrafos y climatólogos especializados en estudios isotópicos están estableciendo ahora cronologías de los corales y los sedimentos que abarcan varios centenares de años. Cuando este trabajo esté terminado, será posible reconstruir la temperatura de la superficie del mar y la frecuencia e intensidad de los episodios del fenómeno El Niño en el pasado en distintos lugares, con el fin de mejorar las previsiones relativas al sistema acoplado océano-atmósfera en el futuro.

F.1.3. Los desequilibrios en los radionucleidos naturales permiten estudiar los sumideros de carbono en el interior de los océanos

101. Hasta el 50% del CO₂ atmosférico que producen los combustibles fósiles es capturado por los océanos y acumulado en su interior mediante la disolución fisicoquímica del CO₂ gaseoso, la

absorción biológica y la posterior sedimentación de materia orgánica muerta. El estudio de este flujo vertical de partículas que contienen carbono hasta el fondo del mar ha sido un reto para los científicos marinos durante muchos años, hasta el reciente descubrimiento de que el torio 234 (producido por el uranio 238 natural del agua de mar) es depositado en la superficie de las partículas en sedimentación. Su período de semidesintegración de 24 días constituye un “reloj” excelente para estudiar la edad y el destino de las partículas que sedimentan en el océano. Utilizando la técnica del torio 234, los oceanógrafos han descubierto una variación en un factor de 100 en los sumideros oceánicos de carbono en diferentes mares, variación que se relaciona estrechamente con el crecimiento y la abundancia de plantas microscópicas o fitoplancton. Esta bomba “biológica” de carbono del océano se considera ahora fundamental para la regulación del límite hasta el cual los océanos continuarán absorbiendo CO₂ y otros gases de efecto invernadero que se acumulan en la atmósfera.

F.2. Medio ambiente terrestre

F.2.1. Estudios radioecológicos

102. Los estudios radioecológicos se desarrollaron en un principio fundamentalmente en el contexto de las investigaciones de los efectos de los ensayos de armas nucleares y de las emisiones de los reactores y las operaciones de reprocesamiento o accidentes. En los últimos años, los Estados Miembros se han interesado más por una variedad de otras fuentes de efectos radiológicos, como los restos de uranio empobrecido de las operaciones militares, las operaciones de explotación y tratamiento de minerales y los materiales radiactivos naturales. Además, se está prestando más atención a nivel mundial al uso de técnicas nucleares y la aplicación de modelos y parámetros derivados en los estudios de evaluación ecotoxicológica de contaminantes distintos de los radionucleidos, así como a la evaluación de los efectos sinérgicos de la contaminación mixta.

103. En todos estos casos, los administradores y reguladores necesitan información para adoptar decisiones fundamentadas. El suministro de datos básicos es importante, pero no es suficiente para atender esta necesidad. Otro instrumento es el uso de modelos predictivos; el OIEA trabaja activamente desde hace tiempo en el desarrollo de modelos genéricos y específicos, así como en la evaluación y tabulación de los valores de los parámetros de los modelos.

104. Los avances recientes en los instrumentos de teledetección, en particular el mejoramiento de la resolución espacial y espectral, están brindando nuevas oportunidades. Un ejemplo de ello son los estudios aéreos con rayos gamma. Hasta hace poco, estos estudios se utilizaban para la prospección minera, pero las recientes mejoras de la resolución espacial han dado lugar a su empleo en aplicaciones ambientales y en otras aplicaciones de gestión de recursos. Los sistemas de información geográfica (SIG) también ofrecen un mecanismo para almacenar, procesar y visualizar datos geográficos de diversos tipos de manera útil para los usuarios finales.

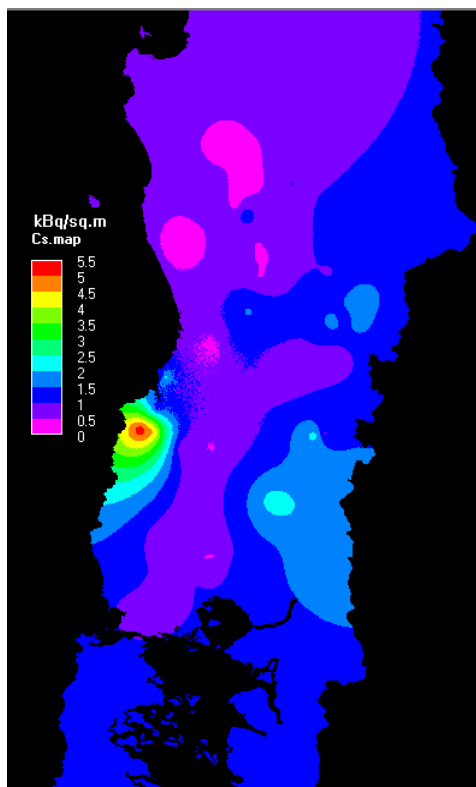


Figura F-1. Ejemplo del uso de SIG en un sistema de apoyo para la adopción de decisiones sobre cuestiones ambientales: Mapa de sedimentación del ^{137}Cs en Chile. Preparado utilizando técnicas de trazado de curvas de nivel junto con datos sobre las precipitaciones y mediciones del ^{137}Cs sobre el terreno¹¹.

G. Utilización de reactores de investigación

105. Los reactores de investigación siguen siendo objeto de atención debido a su necesidad de utilización sostenida y a las cuestiones de seguridad física y tecnológica. En el foro científico celebrado en la reunión de 2004 de la Conferencia General se llegó a la conclusión de que “si bien los reactores de investigación seguirán desempeñando un papel crucial en la ciencia y la tecnología nucleares, es importante garantizar su capacidad operacional en lo que se refiere a los recursos técnicos y financieros necesarios, el cumplimiento de las normas vigentes de seguridad nuclear y convencional, y otros aspectos relacionados con la seguridad física, la aceptación pública y la responsabilidad respecto del medio ambiente. Los aspectos técnicos que deben abordarse comprenden la capacidad de gestión y almacenamiento seguros del combustible gastado, la renovación del reactor cuando sea necesario y la descontaminación y clausura final de la instalación.”

106. Se está estudiando la sustitución de los blancos de uranio muy enriquecido por blancos de uranio poco enriquecido para la producción en gran escala de molibdeno 99, a fin de determinar las esferas en que se requiere apoyo y cooperación internacional.

107. En la medicina y la industria se siguen utilizando ampliamente una gran variedad de otros radioisótopos (más de 150 en diferentes formas). Se está realizando una intensa labor de evaluación de

¹¹ SCHULLER, P., VOIGT, G (Eds), Development of an Environmental Decision Support System (EDSS) to Identify Radioecological Sensitive Areas for Radiocaesium in Chile (CHIRSA), Informe final para la Fundación Volkswagen, Neuherberg (2004).

los radionucleidos adecuados para aplicaciones terapéuticas que pueden producirse fácilmente en reactores de investigación, tales como el ^{177}Lu , con miras a la producción de radiofármacos.

108. Los haces de neutrones de los reactores de investigación son de gran utilidad para estudiar una gama de aplicaciones que emplean técnicas de dispersión de neutrones y de radiografía neutrónica. La ventaja especial de los neutrones es su sensibilidad a los elementos ligeros (a diferencia de los rayos X, que son sensibles a elementos más pesados). Por consiguiente, se logra una resolución superior mediante la radiografía neutrónica de los materiales de ensayos industrialmente importantes, por ejemplo en la investigación de los elementos combustibles. Los adelantos en la caracterización de materiales y en la ciencia de los materiales mediante el uso de la dispersión de neutrones ayudan a desarrollar nuevos materiales. Si bien algunos países ya utilizan estas técnicas, la conciencia cada vez mayor de las posibles nuevas aplicaciones y la adaptación más amplia de esas técnicas han propiciado que se preste cada vez más atención.

H. Utilización de aceleradores

109. El desarrollo de aceleradores robustos en el último decenio ha permitido a muchos laboratorios modernizar sus instalaciones con sistemas muy fiables y que requieren poco mantenimiento para un funcionamiento seguro con operadores no especializados. La utilización de aceleradores más pequeños y compactos en la tecnología y la ciencia aplicada, en lugar de las ciencias básicas, está aumentando. Gracias a los avances técnicos recientes, ahora es posible tener pequeños aceleradores en funcionamiento fuera de los laboratorios de investigación, para aplicaciones *in situ*.

110. Las nuevas fuentes neutrónicas de espalación basadas en aceleradores que se están construyendo actualmente en el Japón y los Estados Unidos serán las principales instalaciones de explotación de neutrones en la ciencia y la tecnología. Estas instalaciones son ejemplos de fuentes neutrónicas accionadas por aceleradores de partículas de alta energía que funcionan a energías de más de 1 GeV. Sus ventajas en comparación con las fuentes de reactores convencionales se derivan en parte de su funcionamiento pulsatorio, un modo más eficiente, que no está disponible en las fuentes basadas en reactores. Además, su funcionamiento pulsatorio puede combinarse con instrumentación adecuada para utilizar los neutrones con una eficiencia aumentada en hasta tres órdenes de magnitud.

111. El alcance de la aplicación de técnicas nucleares basadas en aceleradores en apoyo de los estudios sobre ciencias de los materiales, el desarrollo de nuevos materiales y los estudios ambientales es prometedor. También existe un interés considerable en el uso de análisis con haces de iones y de espectrometría de masas con aceleradores, por ejemplo, la datación con carbono 14, la investigación farmacológica y la vigilancia ambiental.

I. Vigilancia de los procesos industriales

112. La tecnología de obtención de imágenes de la tomografía computadorizada se utiliza para el diagnóstico de las unidades de procesos industriales multifásicos. La tecnología de reactores multifásica es la base del refinado del petróleo, la conversión de gases sintetizados en combustibles y productos químicos, la producción a granel de compuestos químicos de uso común, la fabricación de compuestos químicos y polímeros especiales y la conversión de productos no deseados en materiales reciclables. En la ingeniería de procesos se utiliza la tomografía tanto de transmisión como de emisión de rayos gamma para la inspección de columnas compactas, columnas de burbujeo, flujos multifásicos, lechos fluidizados y medios porosos. La tecnología aún está en evolución, pero podría hacer posibles grandes mejoras de la eficiencia y la seguridad en las industrias de procesos multifásicos. Como adaptación de los avances en la obtención de imágenes médicas, el método SPECT se está introduciendo ahora a escala de laboratorio para los procesos industriales. La obtención de imágenes bidimensionales con una cámara gamma es otra técnica atractiva que está en fase de

desarrollo. Se han hecho progresos también en las técnicas de rastreo de partículas únicas, en particular para investigar los reactores de lecho fluidizado.

I.1. Tratamiento por irradiación - Nanotecnología

113. La nanotecnología es uno de los sectores de la ciencia y la ingeniería que están creciendo con más rapidez, y su valor económico es considerable. La capacidad de fabricar estructuras de precisión con dimensiones y precisión nanométricas es de importancia fundamental para la utilización plena de la tecnología. La radiación es un instrumento eficaz en este sentido, por ejemplo para la modificación y el curado de las superficies. Han surgido nuevas tendencias en el tratamiento de precisión, por ejemplo para las membranas de rastreo de iones y los sistemas de liberación controlada de medicamentos. Las tecnologías de radiaciones que utilizan rayos X, haces electrónicos y haces iónicos son esenciales para una serie de métodos de generación de patrones nanométricos (creación de poros nanométricos), y la litografía que emplea haces electrónicos está siendo objeto de creciente atención. Se está estudiando la radiosíntesis de nanopartículas metálicas (por ejemplo, de cobre o plata) en polímeros o zeolitas para su aplicación en células fotoluminiscentes, fotoeléctricas y solares. La solución de sales metálicas se irradia con rayos gamma y las especies reactivas generadas por la radiación reducen el ión metálico al estado de valencia cero. Los semiconductores de sulfuros metálicos de dimensiones nanométricas se preparan mediante la irradiación con rayos gamma de una solución adecuada de fuentes de monómeros, azufre y metales.