



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Conferencia General

GC(50)/INF/3

Fecha: 7 de julio de 2006

Distribución general

Español

Original: Inglés

Quincuagésima reunión ordinaria

Punto 17 del orden del día provisional
(GC(50)/1)

Examen de la tecnología nuclear 2006

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a peticiones de los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada dos años un amplio *Examen de la tecnología nuclear*, y actualizaciones más resumidas en los años intermedios. En el presente informe se destacan las novedades importantes registradas principalmente en 2005.
- En el *Examen de la tecnología nuclear 2006* se pasa revista a las siguientes esferas: aplicaciones energéticas, fisión y fusión avanzadas, datos atómicos y nucleares, aplicaciones de aceleradores y reactores de investigación, aplicaciones de radioisótopos y tecnología de irradiación, técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación, salud humana, y el agua y el medio ambiente. En el sitio web www.iaea.org se encuentran, en inglés únicamente, otros documentos relacionados con el *Examen de la tecnología nuclear 2006*, sobre la energía nucleoelectrica en los países en desarrollo, el almacenamiento y la disposición final del combustible gastado y los desechos radiactivos de actividad alta, la técnica de los insectos estériles — actividades de investigación y desarrollo, los adelantos en la obtención de radioimágenes médicas con fines de diagnóstico y tratamiento del cáncer, las aplicaciones de la tecnología de haces de neutrones y la parte final del ciclo del combustible del uranio
- En el *Informe Anual para 2005* (GC(50)/4), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el *Informe de Cooperación Técnica para 2005* (GC(50)/INF/4) también figura información sobre las actividades del Organismo relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, observaciones específicas de la Junta y otras recibidas de los Estados Miembros.

Índice

Resumen ejecutivo	1
A. APLICACIONES ENERGÉTICAS	3
A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad	3
A.2. El futuro	6
A.2.1. Aumento de las expectativas	6
A.2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático	7
A.2.3. Cuestiones clave	8
A.2.4. Recursos	13
B. FISIÓN Y FUSIÓN AVANZADAS	15
B.1. Fisión avanzada.....	15
B.2. Fusión.....	17
C. DATOS ATÓMICOS Y NUCLEARES	18
D. APLICACIONES DE ACELERADORES Y REACTORES DE INVESTIGACIÓN	18
D.1. Aceleradores	18
D.2. Reactores de investigación	18
E. APLICACIONES DE RADIOISÓTOPOS Y TECNOLOGÍA DE IRRADIACIÓN	19
E.1. Aplicaciones de radioisótopos.....	19
E.2. Tecnología de irradiación.....	20
E.2.1. Nanotecnología para la industria y la salud	20
E.2.2. Vigilancia de los procesos industriales	21
F. TÉCNICAS NUCLEARES EN LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN	21
F.1. Mejoramiento y protección de cultivos	21
F.2. Producción pecuaria y salud animal	22
F.3. Calidad e inocuidad de los alimentos	23
G. SALUD HUMANA	24
G.1. Estudios del medio ambiente relacionados con la nutrición y la salud.....	24
G.2. La medicina nuclear en la obtención de imágenes y las terapias.....	24
G.3. Dosimetría y radiofísica médica	25
G.4. Radiofármacos	26
G.5. Radiooncología.....	26
H. EL AGUA Y EL MEDIO AMBIENTE.....	27
H.1. Recursos hídricos.....	27
H.1.1. Técnicas de hidrología isotópica	27
H.1.2. Desalación	27
H.2. Medio ambiente	28
H.2.1. Remoción de minas	28
H.2.2. Radionucleidos trazadores de la interacción entre la circulación oceánica y el clima	28
H.2.3. Bioacumulación en las cadenas alimentarias marinas	28
H.2.4. Comprensión de los ciclos del carbono mediante análisis isotópicos de compuestos específicos	29

Examen de la tecnología nuclear 2006

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. Si bien las perspectivas actuales para la energía nucleoelectrica aún son variadas, 2005 fue un año de crecientes expectativas. En marzo, representantes de alto nivel de 74 gobiernos, incluidos 25 representantes de rango ministerial, se reunieron en París con ocasión de una conferencia organizada por el Organismo para examinar el papel futuro de la energía nucleoelectrica. La gran mayoría de los participantes afirmaron que la energía nucleoelectrica puede contribuir de manera importante a satisfacer las necesidades energéticas de un gran número de países desarrollados y en desarrollo, y a sostener el desarrollo del mundo en el siglo XXI. Las crecientes expectativas se deben al historial de comportamiento de la energía nucleoelectrica, a las crecientes necesidades de energía en todo el mundo, unidas al aumento cada vez mayor de los precios del petróleo y el gas natural, a las restricciones ambientales, a las preocupaciones acerca de la seguridad del suministro de energía en varios países, y a los ambiciosos planes de expansión de varios países.
2. El 31 de diciembre de 2005 había 441 centrales nucleares en explotación y 27 en construcción. En 2005 se conectaron a la red cuatro nuevas centrales nucleares (dos en el Japón y una en la India y la República de Corea, respectivamente), y se volvió a conectar una central abandonada en el Canadá. Se retiraron dos centrales nucleares, ambas con arreglo a las políticas nacionales de eliminación gradual de la energía nucleoelectrica, a saber, el reactor Obrigheim de Alemania y el Barsebäck-2 de Suecia. Se iniciaron tres construcciones, Lingao-3 en China, Olkiluoto-3 en Finlandia y Chasnupp-2 en el Pakistán. Olkiluoto-3 es la primera nueva construcción en Europa occidental desde 1991. Asia sigue siendo el centro de expansión, ya que dio cuenta de 16 de los 27 reactores en construcción, y de 24 de los últimos 34 reactores que se han conectado a la red.
3. Los precios del uranio, que durante los últimos quince años habían sido bajos y se habían mantenido estables, siguieron aumentando – de 25\$/kg en 2002 a 112\$/kg en mayo de 2006. 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.
4. Al final de 2005 se habían clausurado completamente ocho centrales, y sus emplazamientos se habían declarado aptos para un uso irrestricto. Diecisiete centrales estaban parcialmente desmanteladas y cerradas en condiciones de seguridad, 31 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.
5. 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. En 2005, Hungría y la República de Corea seleccionaron los emplazamientos para sus

primeros repositorios de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, tras el resultado positivo de los referendos organizados en las comunidades seleccionadas, y en Bélgica dos comunidades votaron a favor de ser candidatas para la construcción de un repositorio de desechos de actividad baja.

6. Prosiguen las investigaciones nacionales sobre diseños avanzados de reactores 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) firmaron en febrero de 2005 un acuerdo marco sobre colaboración internacional en actividades de investigación y desarrollo relacionadas con los sistemas de energía nuclear de la Generación IV. El número de miembros del Proyecto internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del OIEA aumentó a 24, con la adhesión en 2005 de los Estados Unidos de América, y Ucrania. Entre las actividades que se realizan actualmente en el marco del INPRO figuran la finalización de un manual para usuarios sobre la metodología del INPRO, la aplicación de la metodología para la evaluación de los sistemas de energía nuclear innovadores (SENI) en estudios nacionales y multinacionales, el análisis de la función y estructura de los SENI en relación con la satisfacción sostenible de la demanda de energía, y la selección de las esferas de colaboración más apropiadas en materia de desarrollo.

7. En junio de 2005 se produjo un adelanto significativo en la esfera de la energía de fusión, a saber, la firma de la declaración conjunta de todas las partes en las negociaciones relativas al Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) y el acuerdo respecto de la iniciación de la construcción en Cadarache (Francia). Esta decisión señaló una nueva etapa importante en el desarrollo de la energía de fusión: la demostración científica y técnica de la tecnología de la fusión en las condiciones aplicables a la explotación de un reactor de fusión para la producción de electricidad.

8. En el caso tanto de la generación de electricidad como de todas las demás aplicaciones de la energía nuclear, los progresos y las mejoras se sustentan en las continuas investigaciones nucleares básicas. Para lograr que la fusión sea una fuente de energía viable es necesario realizar investigaciones en muchas esferas y disponer de datos atómicos y nucleares fiables. Las aplicaciones de los reactores de investigación constituyen un apoyo para la mayoría de las esferas de la tecnología nuclear, y en el presente examen se describen los usos de los nuevos reactores de investigación en esferas tales como, por ejemplo, la producción de isótopos, la utilización de haces de neutrones y los análisis de activación en relación con el medio ambiente, la agricultura y la alimentación.

9. También se describen los adelantos con respecto a las técnicas basadas en aceleradores, la producción de radioisótopos y algunos nuevos usos de la nanotecnología.

10. Las tecnologías nucleares continúan desempeñando un papel clave y a menudo excepcional en la producción agrícola y la inocuidad de los alimentos, la salud humana y pecuaria, la gestión de los recursos hídricos y el medio ambiente. Mediante el mejoramiento por mutaciones de los cultivos se ha logrado, por ejemplo, aprovechar tierras que anteriormente eran inutilizables en muchos países para la producción de arroz. En la esfera de la salud humana, el empleo de isótopos estables se está convirtiendo en un instrumento aceptado para el desarrollo de programas de nutrición. La medicina nuclear se está beneficiando de los adelantos tecnológicos de la informática. La gestión sostenible de los recursos hídricos y la desalación siguen siendo aspectos importantes del programa internacional. Los nuevos adelantos en el análisis isotópico de muestras hidrológicas parecen ser prometedores en lo que respecta al mayor uso de los isótopos en la gestión de los recursos hídricos. Los adelantos en las técnicas de muestreo y análisis han ayudado a mejorar los conocimientos sobre el medio ambiente. También se describen los adelantos en todas estas esferas.

A. APLICACIONES ENERGÉTICAS

A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad¹

11. Al final de 2005 había en todo el mundo 441 centrales nucleares en explotación, cuya potencia total ascendía a 368 GW(e) y que suministraban alrededor del 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 19 años.

12. En 2005 se conectaron a la red cuatro nuevas centrales nucleares (dos en el Japón y una en la India y la República de Corea, respectivamente), y se volvió a conectar una central abandonada en el Canadá. Esto se compara con cinco nuevas conexiones a la red (y una reconexión) en 2004 y dos nuevas conexiones a la red (y dos reconexiones) en 2003. En 2005 se retiraron dos centrales nucleares, en comparación con cinco en 2004 y seis en 2003. El aumento neto de la potencia nuclear mundial durante 2005 fue de 3 259 MW(e).

13. Utilizando la definición del Organismo de que la construcción comienza con el hormigonado de los cimientos, en 2005 se inició la construcción de tres centrales nucleares: Lingao-3 en China (1 000 MW(e)), Olkiluoto-3 (1 600 MW(e)) en Finlandia y Chasnupp-2 (300 MW(e)) en el Pakistán. Además, se reanudaron los trabajos de construcción en dos centrales nucleares de Bulgaria, cuya clasificación anterior había sido de "construcción suspendida". En 2004 se iniciaron dos construcciones y se reanudaron los trabajos de construcción en dos centrales nucleares de la Federación de Rusia. En 2003 se había iniciado una construcción.

14. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, se centran en Asia. Como se indica en el cuadro A-1, de los 27 reactores en construcción en todo el mundo, al final de 2005, 16 estaban en Asia. Veinticuatro de los últimos 34 reactores que se han conectado a la red se encontraban en Asia.

15. El Japón tiene el programa nucleoelectrico más amplio de Asia. Con la conexión de Higashi Dori-1 a la red en marzo, y de Shika-2 en julio, el Japón tiene ahora 55 reactores en funcionamiento y uno en construcción. También en julio, la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO) volvió a poner en servicio el último de los 17 reactores que se habían puesto en régimen de parada en 2002. El Japón tiene previsto añadir en total 10 unidades a la red hasta 2014, lo que elevaría la proporción de la energía nucleoelectrica en la producción de electricidad del Japón a más del 40%.

16. Con la conexión de la central Ulchin-6 a la red en enero, la República de Corea tiene ahora 20 unidades en funcionamiento. En 2005 se iniciaron los preparativos relacionados con el emplazamiento de Kori-5 y -6. La energía nucleoelectrica representa el 45% de la electricidad del país.

17. En otras partes de Asia, las contribuciones absolutas y relativas de la energía nucleoelectrica son más pequeñas, pero China y la India en particular prevén una expansión significativa. China, que tiene nueve reactores en funcionamiento y tres en construcción, y que produce el 2% de su electricidad con energía nucleoelectrica, prevé una expansión de hasta 40 GW(e) hacia 2020 en relación con el 4% del suministro de electricidad.

¹ El OIEA conserva datos sobre reactores en explotación y en régimen de parada, y sobre los que están en construcción, tal como se describe en el último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf) 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>).

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2005)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2005		Experiencia operacional total hasta 2005	
	No. de unidades	Total MW(e)	No. de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	17	20 339			154,6	31,0	683	5
ARGENTINA	2	935	1	692	6,4	6,9	54	7
ARMENIA	1	376			2,5	42,7	38	3
BÉLGICA	7	5 824			45,3	55,6	205	7
BRASIL	2	1 901			9,9	2,4	29	3
BULGARIA	4	2 722	2	1 906	17,3	44,1	137	3
CANADÁ	18	12 599			86,8	14,6	442	8
CHINA	9	6 572	3	3 000	50,3	2,0	56	11
COREA, REPÚBLICA DE	20	16 810			139,3	44,7	259	8
ESLOVAQUIA	6	2 442			16,3	56,1	112	6
ESLOVENIA	1	656			5,6	42,4	24	3
ESPAÑA	9	7 588			54,7	19,6	237	2
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	103	98 145			780,5	19,3	3 087	6
FEDERACIÓN DE RUSIA	31	21 743	4	3 775	137,3	15,8	870	4
FINLANDIA	4	2 676	1	1 600	22,3	32,9	107	4
FRANCIA	59	63 363			430,9	78,5	1 464	2
HUNGRÍA	4	1 755			13,0	37,2	82	2
INDIA	15	3 040	8	3 602	15,7	2,8	252	0
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA			1	915				
JAPÓN	55	47 593	1	866	280,7	29,3	1 221	3
LITUANIA	1	1 185			10,3	69,6	39	6
MÉXICO	2	1 310			10,8	5,0	27	11
PAÍSES BAJOS	1	449			3,8	3,9	61	0
PAKISTÁN	2	425	1	300	2,4	2,8	39	10
REINO UNIDO	23	11 852			75,2	19,9	1 377	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 368			23,3	30,5	86	10
RUMANIA	1	655	1	655	5,1	8,6	9	6
SUDÁFRICA	2	1 800			12,2	5,5	42	3
SUECIA	10	8 910			69,5	44,9	332	6
SUIZA	5	3 220			22,1	32,1	153	10
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	83,3	48,5	308	6
Total ^b	441	368 264	27	21 811	2 625,9	16%	11 991	8

a. Los datos provienen del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>)

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

— 6 unidades, 4 904 MW(e) en explotación; 2 unidades 2 600 MW(e) en construcción;

— 38,4 TW·h de generación de electricidad nuclear, lo que representa el 20,3% del total de electricidad producida en 2005;

— 146 años y un mes de la experiencia operacional total.

18. La India conectó el Tarapur-4, un reactor de agua pesada a presión de 490 MW(e), a la red en junio. Este país tiene ahora 15 reactores en funcionamiento y ocho más en construcción. En 2004 la energía nucleoelectrica representó el 2,8% del suministro de electricidad. La meta de la India es aumentar la potencia nuclear en un factor de diez hacia 2022 y en un factor de 90 hacia 2052.

19. El Pakistán obtiene el 2,8% de su electricidad de dos reactores nucleares en funcionamiento. En 2005 se inició la construcción del reactor de agua a presión Chasnupp-2, de 300 MW(e). Para 2030 se prevé una potencia nuclear adicional de 8 000 MW(e), lo que elevará al 4,2% la participación de la energía nucleoelectrica en la producción de electricidad.

20. La República Islámica del Irán, que está construyendo una central nuclear, firmó en 2005 acuerdos de suministro de combustible en los que se prevé la devolución del combustible gastado a la Federación de Rusia.

21. En Europa occidental hay 135 centrales nucleares en funcionamiento y ahora también hay una en construcción, ya que en agosto de 2005 se inició la construcción de la central Olkiluoto-3 en Finlandia. Con arreglo a las políticas de eliminación gradual de la energía nuclear vigentes en Alemania y Suecia, se retiraron dos centrales, Obrigheim en Alemania y Barsebäck-2 en Suecia. El Gobierno de los Países Bajos aprobó la prolongación de la vida útil de su central nuclear Borssele hasta 2033, es decir una vida útil de 60 años, y el del Reino Unido prolongó diez años la vida útil de sus centrales Dungeness-B1 y Dungeness-B2. El Gobierno sueco aprobó aumentos de la potencia de 15 MW(e) en las centrales Ringhals-1 y -3, y una petición similar relativa a un aumento de la potencia de 250 MW(e) en la central Oskarshamn-3 ha sido respaldada por los reguladores y aguarda la aprobación oficial. Se hicieron solicitudes adicionales de aumento de la potencia de 120 MW(e) en la central Forsmark-1, de 120 MW(e) en Forsmark-2 y de 170 MW(e) en Forsmark-3.

22. Rusia tiene 31 centrales nucleares en funcionamiento y cuatro en construcción, y en Europa oriental hay 39 centrales en explotación y cinco en construcción. La central rusa Bilibino-2 recibió una prórroga de su licencia de cinco años a principios de 2005, como complemento de una prórroga similar otorgada a la central Bilibino-1 el año anterior. Se trata en ambos casos de pequeñas unidades de 11 MW(e) que suministran calefacción urbana y electricidad en la remota región nororiental de Chukotka.

23. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nacional (CRN) aprobó nueve nuevas prórrogas de licencias de 20 años cada una (por un total de vida útil de 60 años autorizada para cada central nuclear), lo que eleva a 39 el número total de prórrogas de licencias aprobadas. Se promulgó una nueva legislación en materia energética en la que se prevé la cobertura por el Gobierno de los costos asociados a ciertas posibles demoras en la concesión de las licencias y un descuento impositivo por producción en el caso de hasta 6 000 MW(e) de potencia nuclear avanzada. La CRN está examinando tres solicitudes de permisos iniciales relativos al emplazamiento, y espera recibir cuatro solicitudes de licencias combinadas de construcción y explotación a fines de 2007, y posiblemente varias más en 2008.

24. En el Canadá, Pickering A-1 se convirtió en la cuarta unidad reconectada a la red, de las ocho que se habían puesto en régimen de parada en los últimos años. También se llegó a un acuerdo sobre un programa de cuatro años para volver a poner en servicio la quinta y la sexta en Bruce A-1 y Bruce A-2.

A.2. El futuro

A.2.1. Aumento de las expectativas²

25. El año 2005 fue un año de crecientes expectativas para la energía nucleoelectrica. En marzo, representantes de alto nivel de 74 gobiernos, incluidos 25 representantes de rango ministerial, se reunieron en París con ocasión de una conferencia organizada por el Organismo para examinar el papel futuro de la energía nucleoelectrica. La gran mayoría de los participantes afirmaron que la energía nucleoelectrica puede contribuir de manera importante a satisfacer las necesidades energéticas de un gran número de países desarrollados y en desarrollo, y a sostener el desarrollo del mundo en el siglo XXI. Entre ellos se encontraban varios países que en la actualidad no tiene programas nucleoelectricos, como, por ejemplo, Egipto, Indonesia, Marruecos, Polonia, Turquía y Viet Nam. Uno de los desafíos que enfrentan los países que inician un programa nucleoelectrico es el de establecer la infraestructura de apoyo necesaria, incluida la infraestructura jurídica y reglamentaria³.

26. Los factores que contribuyen al aumento de las expectativas son el buen historial, cada vez más prolongado, de la energía nucleoelectrica, el constante aumento de las necesidades mundiales de energía, las nuevas restricciones ambientales, las inquietudes de algunos países respecto de la seguridad del suministro de energía, y los planes concretos de expansión de la energía nucleoelectrica existentes en países tales como la India, China, el Japón, la República de Corea y la Federación de Rusia.

27. Ese historial de la energía nucleoelectrica se refleja en los 11 991 años-reactor de experiencia que se registran en el cuadro A-1, la mejora de los factores de potencia, la reducción de los costos de generación y el excelente historial de seguridad. Ha habido un accidente con importantes consecuencias fuera del emplazamiento, a saber, en Chernóbil en 1986. Este accidente costó vidas y causó gran sufrimiento. Pero también generó cambios importantes, entre ellos, el establecimiento de una "cultura de la seguridad" de mejoras constantes, un análisis minucioso de las experiencias y el intercambio de las mejores prácticas. Esta cultura de la seguridad ha venido demostrando su eficacia durante casi dos decenios, y los países se basan en este historial de seguridad en el momento de considerar la construcción de centrales nucleares.

28. En todos los análisis y proyecciones independientes se prevé un aumento constante de las necesidades mundiales de energía en el siglo venidero. Para poder satisfacer aunque sea una mínima parte de las aspiraciones económicas del mundo en desarrollo, tendrá que haber un aumento significativo de los suministros de energía. Los precios del petróleo y el gas natural aumentaron considerablemente en 2005, lo que confirma las expectativas del mercado de que la demanda crecerá más rápidamente que la oferta.

29. En la figura A-1 se observa el crecimiento histórico de la potencia nuclear mundial desde 1960, así como las proyecciones tanto altas como bajas del Organismo actualizadas en 2005. La diferencia entre las proyecciones bajas y las altas en 2030 es de 222 GW(e). Como se indica en la figura, 66 GW(e) de esta diferencia, o sea el 30%, corresponden a Europa occidental, y 52 GW(e), o sea el 23%, al Lejano Oriente.

² Se puede consultar más información sobre las proyecciones recientes del Organismo en la dirección <http://nesisda2/rds-1/>. La labor del Organismo actual y reciente sobre recopilación de datos y evaluación por expertos de las proyecciones a mediano plazo se describen en el último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf) y en la siguiente dirección del sitio web: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>.

³ En el "Examen de la tecnología nuclear 2006" disponible en IAEA.org se encuentran otros documentos relacionados con este tema.

30. Aunque las expectativas de la energía nucleoelectrónica están aumentando, de una encuesta de la opinión pública a escala mundial contratada recientemente por el Organismo se desprende que continúa habiendo divergencia de opiniones. En el marco de esta encuesta se entrevistaron 18 000 personas de 18 países. Se registró una gran divergencia de opiniones en los diferentes países. En la figura A-2 se indican los resultados globales. El 62%, o sea la mayoría, estuvo a favor de mantener en funcionamiento las centrales existentes; al mismo tiempo el 59%, la mayoría igualmente, se pronunció en contra de construir nuevas centrales. También se formuló una pregunta de seguimiento que incluía breve información sobre las reducidas emisiones de gases de efecto invernadero de la energía nucleoelectrónica, tras la cual el porcentaje a favor de la ampliación de la energía nucleoelectrónica aumentó del 28% al 38% y el porcentaje en contra disminuyó del 59% al 47%.

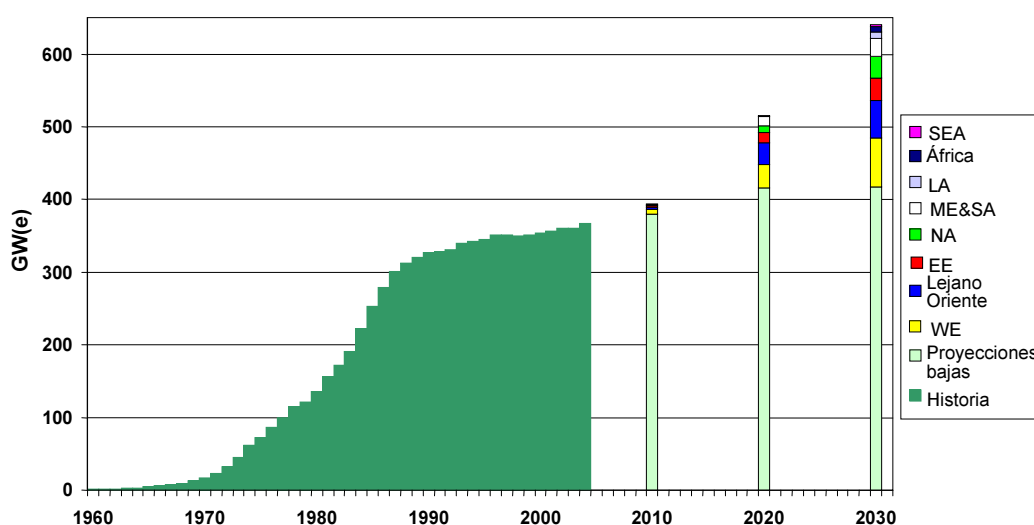


Figura A-1. Potencia nuclear instalada a escala mundial. Las barras verdes oscuras indican el crecimiento histórico desde 1960 hasta 2005. Las barras verdes claras indican las proyecciones bajas del Organismo más recientes para 2010, 2020 y 2030. Los demás colores indican qué cantidad de la diferencia entre las proyecciones bajas y las altas del Organismo es atribuible a las distintas regiones del mundo. (SEA = Sudeste de Asia; LA = América Latina; ME&SA = Oriente Medio y Asia Meridional; NA = América del Norte; EE= Europa oriental; WE = Europa occidental).



Figura A-2. Resultados globales de una encuesta de la opinión pública mundial. Fuente: *Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA: Final Report from 18 Countries, 2005*

A.2.2. Desarrollo sostenible y cambio climático⁴

31. La Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CDS) de las Naciones Unidas se ocupó por primera vez de la cuestión de la energía en su noveno período de sesiones, celebrado en 2001, y en esa ocasión

⁴ Se puede consultar información más detallada acerca de las actividades del Organismo sobre los aspectos del desarrollo sostenible y el cambio climático relacionados con la energía en las secciones pertinentes del último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf) y en el sitio web del Organismo <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

se debatió a fondo la relación entre la energía nuclear y el desarrollo sostenible. Ese debate tuvo dos resultados. En primer lugar, las partes no se pusieron de acuerdo, y en el texto final se señaló que aunque algunos países consideran que la energía nuclear contribuye de manera importante al desarrollo sostenible, otros no. En segundo lugar, las partes estuvieron de acuerdo en que “la decisión de optar por la energía nuclear incumbe a los países”. La energía nucleoelectrica será otra vez tema de debate cuando la CDS se ocupe nuevamente de las cuestiones energéticas en 2006 y 2007.

32. El Protocolo de Kyoto, que entró en vigor en febrero de 2005, exige a la mayoría de los países desarrollados que limiten sus emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) en el “primer período de compromiso”, de 2008 a 2012. Diferentes países han adoptado distintas políticas para cumplir los límites previstos en el Protocolo de Kyoto. No todas benefician a la energía nucleoelectrica, a pesar de sus bajas emisiones de GEI, pero a más largo plazo, los límites respecto de las emisiones de GEI deberían hacer de la energía nucleoelectrica una opción cada vez más atractiva. En el pasado los inversores no veían la ventaja que reporta la energía nucleoelectrica al producir emisiones muy bajas de GEI, ya que la falta de restricciones o impuestos en relación con estas emisiones les inducían a considerar de poco valor económico las medidas para evitarlas.

33. La décima primera Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CoP-11), que tuvo lugar en Montreal en diciembre de 2005, fue la primera en celebrarse después de la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, por lo que también sirvió de foro para la primera reunión de las Partes en el Protocolo de Kyoto (MoP-1). Como tal, aprobó oficialmente las normas para la aplicación del Protocolo de Kyoto que se habían aprobado preliminarmente en la CoP-7 como los Acuerdos de Marrakech. En lo que atañe a las reducciones de las emisiones después del primer período de compromiso (2008-2012), decidió iniciar conversaciones en el marco de un “grupo de trabajo especial de composición abierta ... que se deberá proponer finalizar sus tareas tan pronto como sea posible, y a tiempo para garantizar que no haya una interrupción entre el primero y el segundo períodos de compromiso”. Una cuestión importante para la energía nucleoelectrica en el marco de estas conversaciones será lo que pasará con la actual exclusión, durante el primer período de compromiso, de los proyectos nucleoelectricos de dos de los tres mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto, concretamente el mecanismo para un desarrollo limpio y la aplicación conjunta.

A.2.3. Cuestiones clave

Aspectos económicos

34. Las centrales nucleares tienen una estructura de costos centrada en los desembolsos iniciales, lo que significa que si bien su construcción es relativamente costosa, su funcionamiento es relativamente económico. Por lo tanto, las centrales nucleares existentes que funcionan bien continúan siendo generalmente una fuente de electricidad rentable y competitiva, pero en el caso de las nuevas construcciones, la competitividad económica de la energía nucleoelectrica depende de varios factores. En primer lugar, depende de las alternativas disponibles. Algunos países tienen abundantes recursos energéticos alternativos y otros menos. En segundo lugar, depende de la demanda global de electricidad de un país y de su ritmo de crecimiento. En tercer lugar, depende de la estructura del mercado y las posibilidades de inversión. En igualdad de condiciones, la estructura de costos iniciales de la energía nucleoelectrica es menos atractiva para los inversionistas privados de los mercados liberalizados que valoran la obtención rápida de ingresos, que para los gobiernos que pueden invertir a más largo plazo, especialmente en los mercados reglamentados que garantizan ingresos interesantes. Las inversiones privadas en los mercados liberalizados también dependerán de la medida en que se hayan internalizado los costos y beneficios externos asociados a la energía (p. ej., contaminación, emisiones de GEI, seguridad de los desechos y del suministro de energía). En cambio, los inversionistas públicos pueden incorporar esos factores externos directamente en sus decisiones.

Igualmente importantes son los riesgos en materia de reglamentación. El apoyo político a la energía nucleoelectrónica varía de un país a otro y, dentro de un determinado país, puede cambiar con el tiempo. Los inversionistas tienen que ponderar los riesgos de los cambios políticos que podrían requerir la cancelación del proyecto a mitad del proceso o generar demoras y costos que minarían una inversión inicialmente interesante. Los distintos países también tienen diferentes procesos de aprobación. Algunos son menos previsibles que otros y entrañan mayores riesgos, desde el punto de vista de los inversionistas, de intervenciones o demoras costosas.

35. En la figura A-3 se resumen las nuevas estimaciones de los costos de construcción derivadas de siete estudios recientes⁵. Salvo en el caso de las centrales eléctricas alimentadas con petróleo (costos estimados en un solo estudio) la proyección alta de cada escala de costos es por lo menos 100% más elevada que la proyección baja. Esto se debe en parte a los distintos supuestos tecnológicos aplicados en los diversos estudios, pero también a los factores antes mencionados. Además, las escalas contenidas en la figura A-3 sólo incorporan los costos internalizados. Si se concede, por ejemplo, la prioridad debida a la mejora de la autosuficiencia nacional en materia energética, la opción preferida en una situación específica podría no ser la más económica.

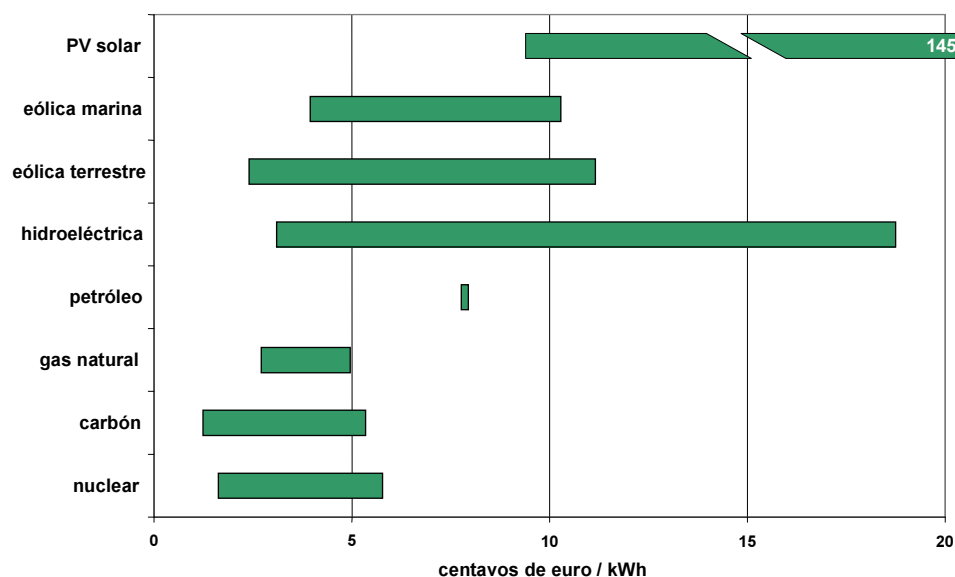


Figura A-3. Escalas de los costos normalizados asociados a las nuevas construcciones, estimados en siete estudios recientes de las tecnologías de producción de electricidad utilizadas en diferentes países. (PV = fotovoltaica)

⁵ Instituto Tecnológico de Massachusetts, *The Future of Nuclear Power*, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos de América (2003); Universidad de Chicago, *The Economic Future of Nuclear Power*, Chicago, Illinois, Estados Unidos de América (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 Storgan, *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 para la Energía Nuclear y Agencia Internacional de la Energía, *Projected Costs of Generating Electricity: 2005 Update*, Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, París, 2005.

Seguridad⁶

36. El intercambio internacional de experiencias en la explotación de centrales nucleares y, en particular, la amplia difusión de las “enseñanzas obtenidas” son elementos esenciales para mantener y fortalecer la seguridad en la explotación de esas centrales. La recopilación, el intercambio y el análisis de la experiencia operacional son elementos fundamentales de la gestión de la seguridad, y hay pruebas empíricas claras de que la aplicación de las enseñanzas extraídas de la experiencia operacional de las centrales nucleares ha contribuido, y continúa contribuyendo, a la mejora de su seguridad. Entre los mecanismos internacionales destinados a facilitar el intercambio figuran la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN) y el OIEA. Las reuniones periódicas celebradas en el marco del Sistema conjunto OIEA/AEN de Notificación de Incidentes, en las que se pueden examinar y analizar en detalle los incidentes ocurridos recientemente, también forman parte de este proceso de intercambio mundial.

37. Los indicadores de la seguridad, como los publicados por la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares y reproducidos en las figuras A-4 y A-5, mejoraron notablemente en el decenio de 1990. Sin embargo, en algunas esferas no se han registrado mejoras en los últimos años, como en el caso de las paradas de emergencia no previstas que se indican en la figura A-4. Asimismo, la diferencia entre las esferas de peor y mejor desempeño aún es considerable, lo que proporciona amplio margen para seguir realizando mejoras. Desde el accidente de Chernóbil en 1986, se han realizado enormes esfuerzos por mejorar las características de seguridad de los reactores, pero todavía hay instalaciones en las que la asistencia en materia de seguridad nuclear debería tener carácter prioritario.

38. El *Examen de la seguridad nuclear* (GC(50)/INF/2) que publica anualmente el Organismo contiene información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

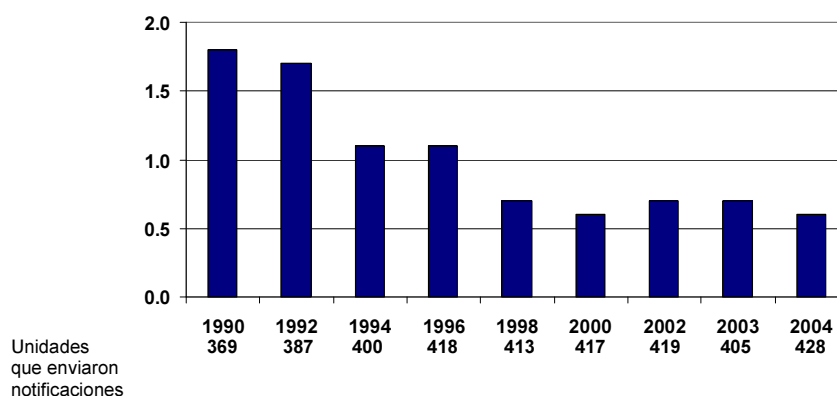


Figura A-4. Paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad. Fuente: *WANO 2004 Performance Indicators*

⁶ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/safety_nuclear.pdf) y en el sitio web del Organismo: <http://www-ns.iaea.org/>.

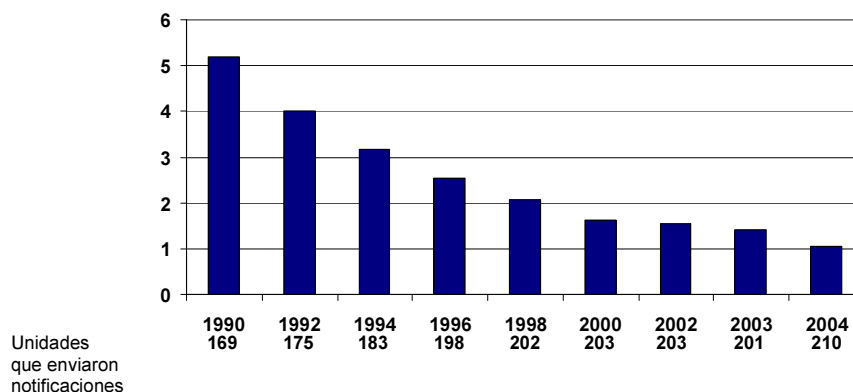


Figura A-5. Accidentes industriales en centrales nucleares por 1 000 000 horas-persona trabajadas. Fuente: *WANO 2004 Performance Indicators*

Combustible gastado, reprocesamiento, desechos y clausura⁷

39. Las 441 centrales nucleares actualmente en funcionamiento en el mundo generan más de 10 000 toneladas anuales de metal pesado (t HM) de combustible gastado. Menos de un tercio se reprocesa, para su reciclaje, como combustible de mezcla de óxidos (MOX). El resto se coloca en instalaciones de almacenamiento provisional. Unas 190 000 tHM se encuentran actualmente en almacenamiento. La mayor parte está almacenada en agua, pero una cantidad cada vez mayor se encuentra almacenada en seco, que es ahora el nuevo método preferido para el almacenamiento del combustible gastado fuera de los emplazamientos de los reactores. El almacenamiento en seco tiene la ventaja de que es modular, lo que permite la distribución en el tiempo de las inversiones de capital y, a más largo plazo, los sistemas de refrigeración pasivos más sencillos utilizados en el almacenamiento en seco reducen las necesidades y los costos de funcionamiento y mantenimiento.

40. La actual capacidad mundial para el reprocesamiento del combustible gastado del sector civil es de aproximadamente 5 000 toneladas de metales pesados por año (t HM/a). Con la construcción de una nueva instalación en Rokkashomura, el Japón añadirá otros 800 tHM/a. La puesta en servicio del proceso del uranio en Rokkashomura comenzó en 2004, la puesta en servicio del proceso radiactivo con combustible gastado debe comenzar en 2006 y la explotación comercial está programada para 2007. La actual capacidad mundial para la fabricación de combustible de MOX es de aproximadamente 200 tHM/a y está previsto que aumente a unos 350 tHM/a hacia 2010.

41. Las investigaciones que se realizan actualmente para mejorar el proceso PUREX empleado en todas las plantas comerciales de reprocesamiento en explotación (y Rokkashomura) abarcan los procesos PUREX avanzados, otros procesos acuosos y varios procesos no acuosos.

42. La manera más eficiente de utilizar el combustible reprocesado es emplearlo en reactores rápidos. En Alemania, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido se han construido reactores rápidos que ya están en funcionamiento. Sin embargo, los primeros incentivos económicos para el reprocesamiento y el reciclaje disminuyeron después de los años setenta, en parte por la desaceleración del crecimiento de la capacidad nuclear, en parte por el aumento continuo de las estimaciones de recursos de uranio y en parte por las fuentes secundarias.

⁷ En el "Examen de la tecnología nuclear 2006", disponible en IAEA.org, se encuentran otros documentos relacionados con este tema. Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la clausura, el combustible gastado y los desechos en las secciones pertinentes del último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf y http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/radioactive_waste.pdf) y en el sitio web del Organismo: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NEFW/index.html> y <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>.

Sólo un reactor rápido, el BN-600 de la Federación de Rusia, funciona hoy como reactor de potencia, y no utiliza combustible reprocesado, sino combustible de uranio muy enriquecido (UME) sin irradiar. Con todo, en 2004 la India inició la construcción de un prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MWE(e) en Kalpakkam, y hay investigaciones en curso en varios países (véase la sección B.1).

43. Los Estados Unidos, Finlandia y Suecia están muy adelantados en la construcción de repositorios para la disposición final de desechos de actividad alta, aunque no está previsto que ninguno comience a funcionar mucho antes de 2020. Los Estados Unidos y Finlandia han escogido cada uno su propio emplazamiento, en el cual realizan las investigaciones necesarias. En 2004 estaba programada la presentación de una solicitud de licencia a la CRN de los Estados Unidos para el repositorio de Yucca Mountain, pero ésta se ha retrasado. Suecia está realizando investigaciones en dos posibles emplazamientos.

44. En noviembre de 2005, luego de un proceso consultivo nacional de tres años, la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares del Canadá (NWMO) recomendó un enfoque "adaptativo gradual" con respecto a la gestión del combustible gastado de ese país. Durante los próximos 30 años el combustible gastado se seguiría almacenando en emplazamientos de reactores, se seleccionaría un emplazamiento adecuado para un repositorio geológico profundo, y se adoptaría una decisión sobre la posibilidad de construir también una instalación centralizada de almacenamiento provisional a poca profundidad para comenzar a recibir combustible gastado en unos 30 años. Con una instalación provisional centralizada o sin ella, el repositorio profundo comenzaría a aceptar combustible gastado en unos 60 años.

45. En Francia, las investigaciones en el laboratorio de investigación subterráneo de Bure relacionadas con la disposición final en arcilla han registrado progresos satisfactorios. La ley de Francia de 1991 sobre investigación y desarrollo en materia de desechos nucleares exige concretamente la adopción de nuevas medidas parlamentarias después de 15 años, y ya comenzó en 2005 un debate público oficial en preparación para esas medidas en 2006. El debate se basa en las investigaciones realizadas desde 1991 en relación con tres enfoques principales: separación y transmutación, disposición final geológica, y acondicionamiento y almacenamiento provisional a largo plazo. Se espera que la nueva legislación aclare las medidas que se han de adoptar a plazo corto y medio para avanzar con respecto a estos tres enfoques.

46. En cuanto a la disposición final de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, en 2005 se produjeron adelantos importantes en Bélgica, Hungría y la República de Corea. En Bélgica, al menos dos comunidades votaron para ser designadas como posibles emplazamientos de un repositorio nacional de desechos de actividad baja (LLW). En Hungría, los residentes de Bataapati votaron por mayoría abrumadora para dar acogida al repositorio final del país para LLW y desechos de actividad intermedia (ILW). Y en la República de Corea, Gyeongju fue designado como el emplazamiento para el primer repositorio de LLW e ILW, a condición de que la evaluación del emplazamiento geológico fuera satisfactoria, después que lo aprobó casi el 90% de los votantes de Gyeongju, en comparación con el 67% al 84% registrado en otras tres comunidades candidatas.

47. En 2005, finalizó la clausura de las centrales nucleares Trojan y Maine Yankee en los Estados Unidos. Con excepción de sus instalaciones independientes de almacenamiento de combustible gastado, ambos emplazamientos quedaron disponibles para su uso público sin restricciones. Así, al final de 2005 se habían clausurado completamente ocho centrales en el mundo, y sus emplazamientos se habían declarado aptos para su uso irrestricto. Diecisiete centrales han sido parcialmente desmanteladas y cerradas en condiciones de seguridad, 31 se hallan en fase de desmantelamiento con vistas a declarar el emplazamiento apto para otros usos, y 30 están siendo objeto de un desmantelamiento mínimo antes de su cierre a largo plazo.

Resistencia a la proliferación⁸

48. Las preocupaciones en torno a la no proliferación han aumentado en los últimos años. La resistencia a la proliferación es la característica de un sistema de energía nuclear que impide la desviación o producción no declarada de materiales nucleares, o el uso indebido de tecnología. Como parte del Foro Internacional de la Generación IV (GIF) y el Proyecto internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) se está prestando mayor atención a la cuestión de las características intrínsecas de la resistencia a la proliferación, es decir, las características que se derivan del diseño técnico de los sistemas de energía nuclear. Éstas se resumen en la sección B.1 sobre la fisión avanzada.

49. En enero de 2006, el Presidente ruso Vladimir Putin esbozó la propuesta de crear un sistema de centros internacionales que prestaran servicios del ciclo del combustible nuclear, incluido el enriquecimiento, de forma no discriminatoria y bajo el control del Organismo. En febrero de 2006, los Estados Unidos de América anunciaron la creación de una Asociación Mundial para la Energía Nuclear, que tendría el objetivo de desarrollar tecnologías de reciclado avanzadas que no separarían el plutonio; la colaboración internacional en el suministro de combustible a los Estados que acuerden no realizar actividades de enriquecimiento y reprocesamiento; reactores avanzados que consuman combustible gastado reciclado y al mismo tiempo generen energía; y reactores pequeños que reúnan las condiciones de seguridad tecnológica y física y que respondan adecuadamente a las necesidades de los países en desarrollo.

A.2.4. Recursos⁹

50. *Los recursos convencionales de uranio identificados* se calculan actualmente en 3,8 millones de toneladas (MtU) con respecto a los recursos recuperables a costos inferiores a 80 dólares/kg y en 4,7 MtU para costos inferiores a 130 dólares/kg. A modo de referencia, el precio del uranio en el mercado al contado al final de mayo de 2006 fue de 112 dólares/kg. Estas estimaciones han aumentado para ambas categorías en los últimos dos años debido a nuevos descubrimientos y a la reasignación de algunos recursos de categorías de costos más altas a categorías de costos más bajas.

51. *Los recursos convencionales no descubiertos* añaden otros 7,1 MtU estimados a costos inferiores a 130 dólares/kg. Ello incluye tanto los recursos que se prevé que se encuentren en yacimientos conocidos o cerca de ellos como los recursos más hipotéticos que se considera que existen en zonas geológicamente favorables, pero aún inexploradas. También hay otros 3,0 MtU calculados de recursos hipotéticos para los cuales no se han especificado los costos de producción.

52. *Los recursos de uranio no convencionales y el torio* amplían aún más la base de recursos. Los recursos de uranio no convencionales incluyen unas 22 MtU que se encuentran en yacimientos de fosfato y hasta 4 000 MtU contenidas en agua de mar. La tecnología para recuperar uranio de los fosfatos está bien desarrollada, con unos costos estimados de 60 a 100 dólares/kgU. La tecnología para extraer uranio del agua de mar sólo ha quedado demostrada a escala de laboratorio, y los costos de extracción se calculan actualmente en 300 dólares/kgU. El torio es tres veces más abundante en la corteza terrestre que el uranio. Aunque las estimaciones actuales de reservas de torio y de recursos

⁸ Se puede consultar más información detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la resistencia a la proliferación y las salvaguardias en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/safeguards.pdf>) y en el sitio web del OIEA: <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

⁹ Se puede consultar más información detallada sobre las actividades del Organismo relativas a los recursos nucleares en las secciones pertinentes del último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf) en el sitio web del OIEA: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_home.html y en [IAEA.org](http://www.iaea.org) en "Nuclear Technology Review 2006".

adicionales totalizan más de 4,5 Mt, estas estimaciones se consideran todavía conservadoras. No abarcan todas las regiones del mundo, y la demanda históricamente reducida del mercado limita la exploración de torio.

53. En la figura A-6 se compara la distribución geográfica de los recursos de uranio convencionales identificados con la distribución de la producción de uranio en 2004. Tres países: Australia, el Canadá y Kazajstán, representan el 50% de los recursos convencionales identificados y el 60% de la producción.

54. La producción de uranio en 2004 totalizó 40 263 tU, sólo un 60% de los requisitos de los reactores del mundo (67 320 tU). Del resto respondieron cinco fuentes secundarias: las reservas de uranio natural, las reservas de uranio enriquecido, el uranio reprocesado a partir de combustible gastado, el combustible de MOX con ^{235}U parcialmente sustituido por ^{239}Pu a partir de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de residuos de uranio gastado (el uranio gastado contiene menos del 0,7% de ^{235}U).

55. De estas cinco fuentes secundarias, la mayor contribución provino de las reservas acumuladas desde el comienzo de la explotación comercial de la energía nucleoelectrónica desde fines del decenio de 1950 hasta aproximadamente 1990. Durante todo este período la producción de uranio superó constantemente los requisitos comerciales debido fundamentalmente a un crecimiento más lento del previsto en la generación de electricidad nuclear, y al alto nivel de producción para fines militares. Desde 1990 la situación se ha invertido, y se han reducido las reservas. Sin embargo, no se dispone fácilmente de información precisa, y las posibles decisiones políticas futuras con respecto a la liberación de material militar para fines comerciales añaden otro elemento de incertidumbre.

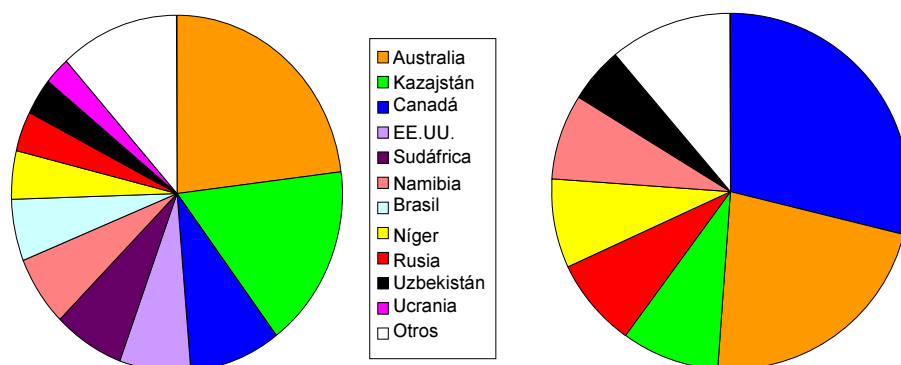


Figura A-6. Distribución geográfica de recursos convencionales de uranio identificados (izquierda) y de producción de uranio en 2004 (derecha).

56. El reciclaje del combustible gastado como combustible de MOX no ha cambiado de manera sensible los requisitos de uranio, debido al número relativamente pequeño de reactores que emplean MOX y al número limitado de reciclajes que son posibles utilizando el reprocesamiento y la tecnología de reactores actuales. El uranio recuperado mediante el reprocesamiento del combustible gastado, conocido como uranio reprocesado, se recicla actualmente sólo en Francia y en la Federación de Rusia. Los datos disponibles indican que éste representa menos del 1% de los requisitos mundiales.

57. Las existencias de uranio empobrecido son importantes, y se calculaban aproximadamente en 1,5 MtU a principios de 2005. El reenriquecimiento, no obstante, es sólo económico hoy día en las plantas de enriquecimiento por centrifugación que tienen capacidad excedente y bajos costos de explotación. No se dispone de datos completos, pero las estadísticas de la Unión Europea (UE) indican que las entregas de residuos reenriquecidos de la Federación de Rusia representaron el 6% del uranio total entregado a reactores de la UE en 2004.

58. Los precios del uranio en general descendieron de principios del decenio de 1980 hasta 1994 a causa de la sobreproducción y la disponibilidad de fuentes secundarias, y entre 1990 y 1994 los bajos precios propiciaron importantes reducciones en muchos sectores de la industria mundial del uranio. Con todo, a partir de 2001 el precio del uranio rebotó a niveles jamás vistos desde los años ochenta, con los precios al contado que se sextuplicaron con creces entre 2001 y 2006.

59. En el cuadro A-2 se resume la posible longevidad de los recursos convencionales de uranio del mundo. Con respecto al actual ciclo del combustible sin reprocesamiento y a un ciclo puro del combustible de reactores rápidos, en el cuadro se calcula el tiempo que durarían los recursos convencionales de uranio, suponiendo que la generación de electricidad a partir de la energía nucleoelectrica se mantenga a su nivel de 2004.

Cuadro A-2. Años de disponibilidad de recursos con respecto a varias tecnologías nucleares

Reactor/ciclo del combustible	Años de producción mundial de electricidad nuclear al nivel de 2004 utilizando recursos convencionales identificados	Años de producción mundial de electricidad nuclear al nivel de 2004 utilizando todos los recursos convencionales identificados
Ciclo del combustible actual (LWR, sin reprocesamiento)	85	270
Ciclo puro del combustible de reactores rápidos con reciclaje	5 000-6 000	16 000-19 000

B. FISIÓN Y FUSIÓN AVANZADAS¹⁰

B.1. Fisión avanzada

60. A corto plazo probablemente las nuevas centrales nucleares sean mejoras evolutivas de diseños existentes. A más largo plazo, los diseños más innovadores que incorporen cambios radicales y prometan plazos de construcción mucho más breves y costos de capital más bajos podrían ayudar a promover una nueva era de la energía nucleoelectrica. Varios diseños innovadores son de pequeña (< 300 MW(e)) a mediana potencia (300–700 MW(e)). Tales diseños podrían ser atractivos para la introducción de la energía nucleoelectrica en países en desarrollo y para lugares distantes.

61. Con los diseños avanzados se trata de lograr mejoras en tres aspectos principales: reducción de costos, aumento de la seguridad, y resistencia a la proliferación.

62. Para disminuir los costos, algunos diseños hacen hincapié en el desarrollo aún mayor de estrategias comprobadas, es decir, economías de escala mediante la utilización de unidades de mayor potencia; calendarios de construcción más breves mediante el uso de sistemas modulares y la tramitación de las cuestiones relativas a las licencias con prontitud; normalización y construcción en serie; construcción de unidades múltiples; y aumento de la participación local, mientras que otros diseños ponen énfasis en nuevas estrategias para la reducción de costos, incluidas las economías de

¹⁰ Se puede consultar más información detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la fisión avanzada en las secciones pertinentes del último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf) y en el sitio web del Organismo <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>. También se puede consultar información sobre las actividades del Organismo relativas a la fusión en el último Informe Anual (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_science.pdf). En 2005 se publicó en la revista *Fusión Nuclear (Nuclear Fusion 45 (2005) A1-A-28)* un informe de situación elaborado por el Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión, en el que se resumen los progresos alcanzados en las investigaciones sobre la fusión durante el último decenio.

producción en serie; el aumento de la exactitud de los códigos y bases de datos para eliminar un diseño excesivo; la fabricación de componentes “inteligentes” que detecten fallos incipientes y reduzcan el alto costo de la dependencia de la redundancia y la diversidad; los sistemas de seguridad pasiva; el desarrollo aún mayor del análisis probabilista de seguridad para apoyar la simplificación de las centrales y la adopción de decisiones reglamentarias con conocimiento de los riesgos; la disminución de componentes que requieran normas exigibles en la industria nuclear; y mayor eficiencia térmica.

63. Con respecto a la seguridad, la labor destinada a lograr mejoras técnicas incluye mayores volúmenes de agua (en el caso de los reactores refrigerados por agua), densidades de potencia más bajas, coeficientes de reactividad negativa mayores, sistemas de seguridad redundantes y diversos con alta fiabilidad demostrada, y sistemas pasivos de refrigeración y condensación.

64. En relación a la resistencia a la proliferación, las medidas intrínsecas incorporadas en varios diseños avanzados se relacionan con la forma química de los materiales nucleares; su masa y volumen, campo de radiación, generación de calor y tasa de generación espontánea de neutrones; la complejidad de las modificaciones necesarias para utilizar una instalación de uso civil y materiales para la producción de armas; y las características de diseño que limitan el acceso a los materiales nucleares.

65. En Alemania, la Argentina, China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, la República de Corea y la Unión Europea se está realizando una importante labor relacionada con el diseño de grandes reactores avanzados de agua ligera (LWR). Tanto el Canadá como la India están trabajando en diseños avanzados de reactores de agua pesada, y se están elaborando diseños de reactores avanzados refrigerados por gas en China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, la República de Corea y Sudáfrica. El diseño y examen de la seguridad de una unidad de demostración del reactor modular de lecho de bolas y de alta temperatura de 168 MWe en Sudáfrica ha concluido y se está realizando un examen para la concesión de la licencia. 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.

66. Dos importantes esfuerzos internacionales complementan las anteriores iniciativas destinadas a promover la innovación: el Foro Internacional de la Generación IV y el Proyecto Internacional del Organismo sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO). 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 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. En febrero de 2005 el Canadá, los Estados Unidos, Francia, el Japón y el Reino Unido firmaron un *acuerdo marco sobre colaboración internacional en actividades de investigación y desarrollo respecto de sistemas de energía nuclear de la Generación IV*. El acuerdo aclara las normas fundamentales explícitamente aplicables a las investigaciones conjuntas y otras actividades de cooperación y establece las bases sobre las cuales puedan negociarse ahora proyectos específicos del GIF.

67. En 2004, el INPRO publicó directrices revisadas y una metodología para evaluar los sistemas de energía nuclear innovadores (SENI). Entre las actividades actuales se incluye la finalización de un manual para usuarios sobre la metodología del INPRO con miras a ayudar a los usuarios a evaluar los SENI; la aplicación de la metodología a la evaluación de los SENI en los estudios nacionales y multinacionales; análisis de la función y estructura de los SENI para satisfacer la demanda de energía nacional, regional y mundial de manera sostenible, y la selección de las esferas de colaboración más apropiadas para el desarrollo de la cooperación. En 2005 el INPRO aumentó a 24 miembros, con la adición de los Estados Unidos de América, Marruecos y Ucrania.

B.2. Fusión

68. En junio de 2005 se firmó una declaración conjunta de todas las partes en las negociaciones del reactor termonuclear experimental internacional (ITER), y se llegó a un acuerdo sobre el emplazamiento para su construcción en Cadarache (Francia). Esta decisión marcó una nueva etapa importante en el desarrollo de la energía de fusión: la demostración científica y técnica de la tecnología de la fusión en las condiciones aplicables a la explotación de un reactor de fusión para la producción de electricidad. En diciembre de 2005 la India pasó a ser el séptimo miembro del proyecto ITER.

69. El aprovechamiento de la energía de fusión nuclear plantea muchos desafíos, incluso mayores necesidades de acceso a datos atómicos y moleculares exhaustivos y fiables. Con la próxima construcción del ITER, muchas cuestiones asociadas a la energía atómica, las técnicas moleculares y la interacción plasma-superficie han asumido mayor importancia. El Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF)¹¹ ha identificado varias cuestiones significativas, como el inventario de tritio y su eliminación, la física del borde del plasma, y las impurezas de elementos pesados. En 2006 se emprenderá una iniciativa destinada al estudio y la cuantificación de las propiedades de erosión de los materiales de las paredes de contención de los reactores de fusión, que tendrá una influencia directa en el conocimiento de la absorción de tritio por los componentes de las paredes.

70. El aumento de los conocimientos sobre la física de plasmas confinados está contribuyendo a mejorar los parámetros para la explotación optimizada de las centrales de fusión. Los sistemas de confinamiento magnético alternativos, como el tokamak esférico y el estelarator (dispositivos utilizados para confinar el plasma caliente con campos magnéticos a fin de sostener una reacción de fusión nuclear controlada) han hecho también progresos significativos atendiendo a los parámetros de funcionamiento alcanzados. Wendelstein-7X, el estelarator más grande del mundo, que está en construcción en Alemania y que está previsto que comience a funcionar a más tardar en 2010, impulsará las investigaciones en relación con el funcionamiento en régimen estable de las centrales de fusión.

71. Los adelantos alcanzados en el conocimiento de la física en las investigaciones sobre la fusión inercial han propiciado el diseño y fabricación de instalaciones de rayos láser de dos megajulios para experimentos de fusión-ignición; la Instalación Nacional de Ignición de los Estados Unidos se está construyendo en Livermore, y la instalación Laser Megajoule, cerca de Burdeos, en Francia. Se espera que estén listas para realizar experimentos en 2008-2010. También se está desarrollando un sistema nuevo relacionado con la fusión inercial, denominado sistema de ignición rápida, que requiere el uso de un láser ultraintenso. El desarrollo de láseres ultraintensos subpico-segundo ya está en etapa avanzada en el programa Experimento de realización de ignición rápida (FIREX) en Osaka (Japón)

¹¹ En 2005 el CIIF publicó en la revista *Fusión Nuclear (Nuclear Fusion 45 (2005) A1-A-28)* un informe de situación relativo a las investigaciones sobre la fusión, en el que se resumen los progresos alcanzados en las investigaciones sobre la fusión durante el último decenio.

C. DATOS ATÓMICOS Y NUCLEARES

72. La disponibilidad de una gama amplia y completa de datos atómicos y nucleares es un requisito indispensable para la investigación básica en física nuclear y la planificación, el diseño y la explotación satisfactorios de las centrales nucleares y las instalaciones asociadas de reprocesamiento y de manipulación de desechos, así como para aplicaciones como la medicina nuclear y técnicas analíticas nucleares específicas. El creciente interés en el uso de los sistemas accionados por aceleradores (SAA) incrementará la demanda de datos nucleares fiables y de alta calidad para fines de física/ingeniería de reactores y cómputos de transporte de materiales radiactivos.

73. Se han producido datos más fiables para garantizar el aumento de la confianza en las evaluaciones relacionadas con la fisión y la fusión, incluidos parámetros tan importantes como secciones eficaces de neutrones térmicos del uranio 238, datos de leyes de dispersión térmica, secciones eficaces actualizadas para cálculos neutrónicos de dispositivos de fusión y SAA, y otros importantes parámetros atómicos y nucleares. Continúan los avances en la compilación y evaluación de datos atómicos y moleculares, por ejemplo, con el fin de producir datos atómicos y moleculares para la elaboración de modelos de plasma y para impurezas de elementos pesados en reactores de fusión.

D. APLICACIONES DE ACELERADORES Y REACTORES DE INVESTIGACIÓN

D.1. Aceleradores

74. La utilización de aceleradores de partículas cargadas, en particular aceleradores de protones y aceleradores de electrones, sigue contribuyendo a lograr adelantos significativos en las esferas de los materiales avanzados, la atención de la salud, y las ciencias físicas y biológicas. Tendencias notables son el surgimiento de nuevas aplicaciones como el uso de haces de iones centrados, por ejemplo, para el micromaquinado, en nanotecnología y en técnicas de irradiación de células.

75. Está aumentando el interés en el comportamiento de materiales no típicos en el ámbito de las aplicaciones de los haces de iones. Por ejemplo, las investigaciones están propiciando el aumento de los conocimientos respecto de la relación entre estructura y propiedades de la próxima generación de materiales de aislamiento.

76. En los Estados Unidos y el Japón se están construyendo dos nuevas fuentes de espalación pulsadas (uno de los procesos mediante los cuales puede utilizarse un acelerador de partículas para producir un haz de neutrones). Las fuentes de espalación existentes, por ejemplo, ISIS en el Reino Unido y SINQ en Suiza, se están actualizando y están surgiendo nuevas aplicaciones en física, física de semiconductores, magnetismo y biología.

D.2. Reactores de investigación

77. La producción de radioisótopos, las aplicaciones de haces de neutrones, la impurificación de silicón y la irradiación de materiales siguen siendo las principales aplicaciones de muchas instalaciones de reactores de investigación. Se están construyendo nuevos reactores de investigación, como el reactor OPAL en Australia, el reactor de investigación avanzado de diseño chino (CARR) en China, y el TRIGA-II en Marruecos, y otros se han puesto en servicio recientemente, como el FRM-II en Alemania y el reactor miniatura fuente de neutrones (MNSR) en Nigeria. En Bélgica, una nueva

instalación de irradiación accionada por acelerador, MYRRHA, se halla en una fase avanzada de desarrollo. Su objetivo es servir de instalación europea de investigación de fines múltiples.

78. El FRM-II en Alemania está concebido para utilizar haces de neutrones y tiene características que incluyen una fuente de neutrones secundaria y accesorios como guías de neutrones para experimentos especiales. Estas características son útiles en los estudios de polímeros de materia suave, especies biológicas y líquidos y materiales desordenados. El reactor de investigación MNSR en Nigeria, por otra parte, se utilizará ampliamente para el análisis por activación para aplicaciones en esferas como el medio ambiente, la agricultura y la alimentación.

79. Se espera que los reactores de investigación polivalentes, como el reactor OPAL en Australia y el CARR en China, comiencen a funcionar en 2006, en que las principales actividades serán la producción de radioisótopos, la impurificación de silicón y las aplicaciones de haces de neutrones¹².

80. El Programa de enriquecimiento reducido para reactores de investigación y de ensayo (RERTR) está destinado a la conversión de reactores de investigación que emplean combustible de uranio muy enriquecido (UME) en reactores que utilicen combustible de uranio poco enriquecido (UPE). El apoyo constante para la fabricación y cualificación de combustibles de UPE de alta densidad y para el fomento de la producción de molibdeno 99 por fisión con el empleo de blancos de UPE son otras actividades previstas en el programa RERTR.

81. Existe la preocupación de que la disponibilidad de radioisótopos en el futuro no sea fiable si no se presta ahora la debida atención a la satisfacción de las futuras necesidades de irradiación de los reactores de investigación. Hay sólo cuatro productores industriales importantes de molibdeno 99, pero se utilizan muchos más reactores de investigación para irradiar blancos de UME/UPE. No hay ninguna tendencia discernible de que las empresas industriales consideren un cambio a favor del uso de blancos de UPE, y los participantes en el programa RERTR han centrado más su atención en esta cuestión. La demostración satisfactoria por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), en la Argentina, de la producción ordinaria de molibdeno 99 a mediana escala utilizando blancos de UPE producidos en el país es un avance notable a este respecto.

E. APLICACIONES DE RADIOISÓTOPOS Y TECNOLOGÍA DE IRRADIACIÓN

E.1. Aplicaciones de radioisótopos

82. Actualmente se utilizan más de 150 radioisótopos distintos en varias formas para diversas aplicaciones en muchos sectores de importancia económica, incluso la medicina, la elaboración de alimentos, la industria, la agricultura, la seguridad estructural y la investigación. El potencial de ampliación de las aplicaciones de los radioisótopos y de difusión de los beneficios a los países en desarrollo sigue siendo grande. En veinticinco países por lo menos se producen radioisótopos y es probable que otros treinta países o más también produzcan isótopos, como se informó en un estudio

¹² En el anexo "Examen de la tecnología nuclear 2006" disponible en IAEA.org se encuentran otros documentos relacionados con este tema.

del OIEA/OCDE¹³. El sector médico absorbe la mayoría de las aplicaciones isotópicas, al que sigue la industria y la investigación.

83. Los sistemas de generadores de radionucleidos siguen desempeñando un papel clave para la obtención de radioisótopos tanto de diagnóstico como terapéuticos para diversas aplicaciones en la medicina nuclear, la oncología y la cardiología de intervención. El uso del ytrio 90 para la terapia con radionucleidos goza de aceptación porque el radionucleido predecesor, el estroncio 90, se obtiene en grandes cantidades del reprocesamiento del combustible gastado. La recuperación de estroncio 90, y seguidamente la separación centralizada en gran escala del ytrio 90 o la producción de generadores de radionucleidos, podría convertirse en un importante proceso radioquímico en los países que poseen instalaciones de reprocesamiento de combustible.

84. El interés en el establecimiento de ciclotrones médicos para la producción de radioisótopos se está acrecentando en muchos países en desarrollo. La producción de radioisótopos del yodo con el empleo de un blanco de telurio enriquecido está siendo objeto de estudio como modo de producción económico.

E.2. Tecnología de irradiación

E.2.1. Nanotecnología para la industria y la salud

85. En Alemania se han desarrollado nanocompuestos poliméricos curables por radiación con propiedades mecánicas de superficie mejoradas. Se han producido revestimientos transparentes resistentes a rayaduras y a la abrasión mediante el curado por radiación de fórmulas de acrilatos que contienen gran cantidad de rellenos de silicio y alúmina.

86. Los geles de polímeros macroscópicos son actualmente biomateriales bien establecidos que se utilizan normalmente como lentes de contacto blandos, apósitos de hidrogel y dispositivos para la administración controlada de fármacos. Cada vez hay más interés en la síntesis, las propiedades y las aplicaciones de los geles poliméricos microscópicos, es decir, los microgeles y nanogeles. Los nanogeles son estructuras de polímeros reticulados de diámetros inferiores a un micrón cuyo tamaño es similar al de una única molécula de polímero en solución. Estos geles tienen posibles aplicaciones como transportadores de fármacos y genes, fármacos poliméricos, biomarcadores, y también como sustratos para separación y adsorción de biomoléculas. Los nanogeles se obtienen en su mayoría por polimerización en emulsión. Un grupo en Polonia ha propuesto el reticulado intramolecular de espirales de polímero único mediante la irradiación de soluciones diluidas con electrones de impulsos cortos, cuyas ventajas son la falta de monómeros, agentes de reticulado y otros compuestos potencialmente tóxicos, que se requieren en procedimientos convencionales.

87. La litografía de haces de electrones para la tecnología de escritura directa tiene un amplio uso para la fabricación de dispositivos de circuitos integrados a nanoescala. Investigadores universitarios de Glasgow (Reino Unido) utilizaron un instrumento litográfico de haces de electrones para fabricar elementos con sólo 20 nm de diámetro en una frecuencia de 100 nm que producen conjuntos de nanopuntos para su utilización en la ingeniería celular.

¹³ *Beneficial Uses and Production of Isotopes*, Agencia para la Energía Nuclear, publicación de la OCDE y el OIEA, No. 5293, 2005.

E.2.2. Vigilancia de los procesos industriales

88. Las técnicas de radiotrazadores y fuentes selladas siguen utilizándose de manera generalizada en varias industrias para controlar mejor los procesos de producción, aumentar la eficiencia de los procesos, mejorar la calidad y cantidad de los productos y verificar la información obtenida por otros métodos.

89. La tomografía de procesos industriales puede proporcionar información pormenorizada sobre la distribución de la densidad de secciones eficaces designadas de un reactor químico. La tomografía de transmisión gamma se emplea actualmente por los inventores y fabricantes de sistemas de procesos químicos para medir la distribución espacial de la densidad dentro de las vasijas o tuberías de los procesos. Con todo, el desarrollo de un escáner tomográfico industrial normalizado para aplicaciones in situ es complejo debido a la variedad de lugares, medios y diseños distintos de columnas de procesos industriales. El desarrollo de sistemas de imágenes tomográficas portátiles y transportables que utilicen fuentes de radioisótopos será importante en el futuro como instrumento de diagnóstico indispensable para los procesos y sistemas industriales.

90. La técnica de la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT), que se emplea en gran medida en la medicina nuclear, es probable que pronto se utilice para el diagnóstico de reactores industriales. La información obtenida de la SPECT será más fiable y específica que la que ofrecen otros métodos. La tomografía de emisión de rayos gamma es un nuevo método para investigar la dinámica del flujo en los reactores industriales. Por ejemplo, la distribución del flujo líquido en reactores de lecho fijo fue investigada utilizando esta técnica. En la figura E-1 se observa un ejemplo de investigación de la distribución radial del flujo líquido en una columna industrial, como la que se encuentra en una refinería.

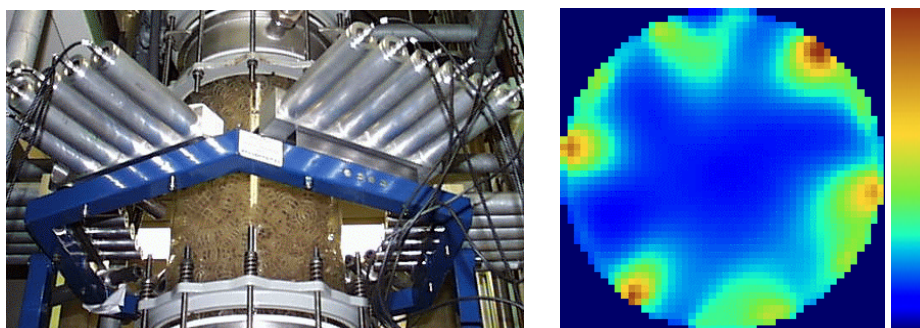


Figura E-1. Sistema de tomografía con 36 detectores colimados instalado alrededor de la columna. La fase líquida, marcada con 1,9 GBq de tecnecio 99m, se inyecta, y el resultado indica alguna canalización de agua en la pared de la columna.

F. TÉCNICAS NUCLEARES EN LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN

F.1. Mejoramiento y protección de cultivos

91. Las técnicas nucleares sirven de útiles instrumentos a los fitogenetistas y desempeñan un papel importante en el mejoramiento de los cultivos. Entre las aplicaciones de las técnicas nucleares en esta esfera se cuentan la inducción de mutaciones para aumentar la variabilidad del germoplasma con el empleo de rayos X y neutrones rápidos; el marcado de ácidos nucleicos utilizados como calibradores

para dactilación genética, trazado y selección con ayuda de marcadores; y la mutagénesis para los análisis de la función de los genes.

92. Las mutaciones inducidas, creadas por rayos gamma, rayos X, neutrones rápidos o sustancias químicas, han permitido obtener algunos éxitos importantes en el fitomejoramiento. Durante más de 50 años los fitogenetistas han seleccionado y utilizado mutantes beneficiosos. En la base de datos sobre variedades de mutantes de la FAO/OIEA se han registrado oficialmente hasta la fecha casi 2 500 variedades de mutantes de 160 especies de plantas de todo el mundo. Por ejemplo, en Viet Nam se ha divulgado un cultivar de arroz mutante (VND95-20) con gran calidad y tolerancia a la salinidad, que es una de las cinco principales variedades de arroz de exportación y ocupa el 28% de la zona de arroz de exportación de un millón de hectáreas del delta del Mekong. La zona objetivo de cultivares de arroz tolerantes a la salinidad solamente para Bangladesh, la India, Filipinas y Viet Nam se calcula en 4,3 millones de hectáreas.

93. El desciframiento de las funciones de los genes es actualmente uno de los principales objetivos de la genética. Las grandes cantidades de información sobre secuencias de ADN y de mutantes inducidos que se pueden obtener fácilmente se están convirtiendo en elementos fundamentales de los estudios de genética, ya que proporcionan los recursos necesarios para el descubrimiento sistemático de los genes y su análisis funcional. La inducción dirigida de lesiones locales en los genomas (TILLING) constituye un ejemplo de técnica que permite identificar rápidamente los mutantes de genes seleccionados. Esta técnica se está aplicando actualmente al arroz, el trigo y la cebada, y presenta grandes posibilidades como método para diseccionar los genes que controlan las características valiosas de diversos cultivos o que influyen en ellas.

94. Hasta la fecha, el uso y el envío transfronterizo de insectos estériles ha estado excluido de la Norma internacional para medidas fitosanitarias N° 3 (NIMF 3), titulada “*Código de conducta para la importación y liberación de agentes exóticos de control biológico*”, de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), porque los agentes de control biológico estaban definidos como organismos autorreproductivos. En abril de 2005 se aprobó una NIMF 3 revisada con el título “*Directrices para la exportación, el envío, la importación y liberación de agentes de control biológico y otros organismos benéficos*” en la que se incluye explícitamente a los insectos estériles como organismos benéficos. Además, los términos “insecto estéril” y “técnica de los insectos estériles” (TIE)¹⁴ fueron incluidos en el *Glosario de términos fitosanitarios* de la CIPF. Esto facilitará la aplicación de la TIE en los Estados Miembros y muestra que el uso de los insectos estériles como parte de la gestión integrada de las plagas está actualmente reconocido a escala internacional en virtud del Acuerdo sobre la aplicación de medidas sanitarias y fitosanitarias de la Organización Mundial del Comercio.

F.2. Producción pecuaria y salud animal

95. Los diagnósticos moleculares y nucleares revisten un interés particular en la esfera de la salud animal porque permiten aumentar la sensibilidad y el carácter específico de los métodos para detectar enfermedades pecuarias a un nivel anteriormente inalcanzable. A pesar del uso cada vez mayor de métodos no radiactivos, sigue siendo necesario utilizar radioisótopos para identificar y caracterizar las proteínas, el DNA y el ácido ribonucleico (ARN) debido a los altos grados de sensibilidad que se pueden alcanzar. La evolución de la microfabricación, la microfluidica y la nanotecnología brindan posibilidades para producir dispositivos más sensibles, rápidos y resistentes que pueden funcionar en condiciones diversas. Los dispositivos llamados “laboratorio en un chip” permiten integrar

¹⁴ En el “*Examen de la tecnología nuclear – 2006*” disponible en IAEA.org se encuentran otros documentos relacionados con este tema.

diagnósticos de laboratorio complejos (tratamiento de muestras, amplificación y detección de blancos, y diferenciación de las detecciones) en un solo dispositivo miniaturizado. Un objetivo importante del actual desarrollo de los dispositivos de diagnóstico es lograr que se puedan utilizar en el terreno, reduciendo así el tiempo de reacción para aplicar medidas preventivas o de control. Además de las tecnologías nucleares más clásicas, los métodos de expresión de genes basados en técnicas nucleares están facilitando una mayor comprensión de elementos relativos a la nutrición, la reproducción y las enfermedades que dan lugar a manipulaciones de fácil uso para mejorar la productividad del ganado.

96. Tradicionalmente, el radioinmunoanálisis (RIA), que emplea radioisótopos para medir la concentración de una molécula determinada en una muestra biológica, ha sido la tecnología dominante en el ámbito de la reproducción y la cría de animales. Los radioisótopos también constituyen la base de una serie de tecnologías centradas en el marcado de nucleótidos. Mediante la incorporación de radioisótopos (como el fósforo 32, el fósforo 33 o el azufre 35) en sondas sintéticas cortas de ADN, los investigadores pueden identificar el polimorfismo del ADN (que permite la identificación de los genes que influyen en características de interés) y confirmar el parentesco y/o medir la cantidad de ADN o ARN en una muestra biológica dada. Los ensayos posteriores permiten determinar cuáles son los animales que poseen las mejores formas de los genes de interés, y esa información se puede utilizar para mejorar la exactitud de la selección y, a su vez, aumentar la productividad. Además, la identificación y el rastreo de los tipos de polimorfismo del ADN pueden contribuir a la caracterización genética de las razas deseadas y destacar la conservación genética. Las tecnologías novedosas como la absorciometría de rayos X de energía dual, la espectrometría por resonancia magnética y la tomografía computarizada podrían constituir métodos para determinar la composición corporal, la calidad de la res sin despojos y el desarrollo muscular sin necesidad de sacrificar los animales.

97. Los recientes adelantos en la mejora de la especificidad de los radioinmunoanálisis de la leptina (hormona proteínica que desempeña un papel clave en el metabolismo y la regulación del tejido adiposo) y de los factores de crecimiento insulínico, así como un conocimiento más amplio de sus mecanismos de funcionamiento, indican que se podrían utilizar (solos o en combinación con agua marcada con oxígeno 18 e hidrógeno 2), al igual que las técnicas de tasa de entrada de dióxido de carbono con carbono 13 o carbono 14, para evaluar el estado nutricional, reproductivo y energético de los animales. Las técnicas nucleares no invasivas como la emisión de rayos X inducidos por protones, la emisión de rayos gamma inducidos por protones, la espectrometría de masas de ionización térmica, la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo y la espectroscopia de fluorescencia de rayos X para la realización de análisis elementales tienen cada vez más aplicaciones nutricionales y toxicológicas en los estudios sobre el ganado.

F.3. Calidad e inocuidad de los alimentos

98. En los sistemas de control de los alimentos se debe tener en cuenta toda la cadena de producción alimentaria a fin de garantizar la calidad, inocuidad y comestibilidad de los productos vegetales y animales destinados al consumo humano, aspectos importantes también para el comercio transfronterizo. Actualmente son más los gobiernos que aplican este concepto, en parte debido a las crecientes preocupaciones de los consumidores en relación con la inocuidad de los alimentos. Las técnicas nucleares y conexas ayudan a los gobiernos a aplicar una estrategia en relación con la cadena alimentaria mediante el desarrollo de metodologías, indicadores y directrices que protegen las cadenas tróficas contra peligros relacionados con la seguridad desde la fuente por medio de las buenas prácticas agrícolas, incluido un enfoque coordinado en la aplicación de las mejores prácticas en la gestión de los recursos hídricos. Esas actividades incluyen la mejora de la gestión de la calidad en laboratorios y de las técnicas analíticas para cumplir con las normas internacionales relativas a los plaguicidas, las micotoxinas y los residuos de medicamentos veterinarios. Forman parte de las actividades la aprobación del documento titulado Directrices del Codex sobre la Utilización de la

Espectrometría de Masas (EM) para la Identificación, Confirmación y Determinación Cualitativa de Residuos, elaborado en un contexto de colaboración y presentado en el 28º período de sesiones de la Comisión del Codex Alimentarius FAO/OMS.

99. El éxito de la aplicación de las normas internacionales previamente aprobadas relativas al uso de la radiación ionizante, actualmente utilizada por más de 50 países de todo el mundo, para el control de patógenos transmitidos por los alimentos y de plagas de insectos queda reflejado, en parte, por la reciente promulgación de reglamentos armonizados en otros cinco países en relación con diversos tipos de alimentos.

100. Otras actividades relativas a la aplicación de normas internacionales para la protección de los consumidores y la facilitación del comercio de los productos agrícolas incluyen una base de datos en línea¹⁵ sobre las primeras medidas adoptadas por los gobiernos en respuesta a emergencias nucleares que afectan a la agricultura. También se intensificará el comercio internacional desde las regiones afectadas mediante actividades de colaboración destinadas a revisar y ampliar los Niveles de orientación para radionucleidos en alimentos objeto de comercio internacional aplicables después de una contaminación nuclear accidental, del Codex, a fin de que se abarquen otros isótopos y se prevea un período superior a un año después de un accidente nuclear o un suceso radiológico.

G. SALUD HUMANA

G.1. Estudios del medio ambiente relacionados con la nutrición y la salud

101. En el pasado se han utilizado las técnicas de isótopos estables como instrumentos de investigación nutricional, pero actualmente también se están utilizando para elaborar y evaluar programas de nutrición. Las técnicas pueden aplicarse a los grupos de población más vulnerables, es decir, los lactantes y los niños, dado que solamente se utilizan isótopos estables (no radiactivos). El uso de isótopos estables permite aumentar, en comparación con las técnicas convencionales, la precisión y especificidad de las mediciones. Por ejemplo, se puede lograr una mayor comprensión de la eficacia de las intervenciones nutricionales basadas en los cambios de la composición corporal (masa muscular) medidos con técnicas de isótopos estables. Estas técnicas permiten abordar la necesidad de evaluar las estrategias basadas en los alimentos localmente adecuadas y sostenibles sobre la situación nutricional de las personas con VIH/SIDA y destacar la importancia que reviste la integración de la nutrición en una respuesta amplia al VIH/SIDA, como destacó recientemente la Organización Mundial de la Salud.

G.2. La medicina nuclear en la obtención de imágenes¹⁶ y las terapias

102. La obtención de imágenes mediante tomografía por emisión de positrones (PET) es actualmente uno de los temas principales en la mayoría de las reuniones sobre obtención de imágenes con fines médicos, y se ha registrado un aumento notable de las publicaciones sobre PET (véase la figura G-1). Esta técnica, que utiliza radioisótopos de período ultra corto unidos a marcadores biológicos, permite a los médicos especializados en medicina nuclear seguir las funciones orgánicas a escala molecular. En particular, gracias al uso de la glucosa radiomarcada conocida como FDG (fluorodeoxiglucosa 18) o la

¹⁵ Se puede acceder a la base de datos en la dirección <http://www.iaea.org/programmes/nafa/dx/emergency/index.html>.

¹⁶ En el "Examen de la tecnología nuclear – 2006" disponible en IAEA.org se encuentran otros documentos relacionados con este tema.

colina C11, se pueden estudiar los órganos en relación con el metabolismo de la glucosa y los aminoácidos. Las imágenes de PET fusionadas con las imágenes obtenidas mediante tomografía computadorizada con rayos X suministran detalles complejos y cambios cuantitativos reales en la salud de cada paciente, lo que se traduce en cambios en la forma de controlar la enfermedad.

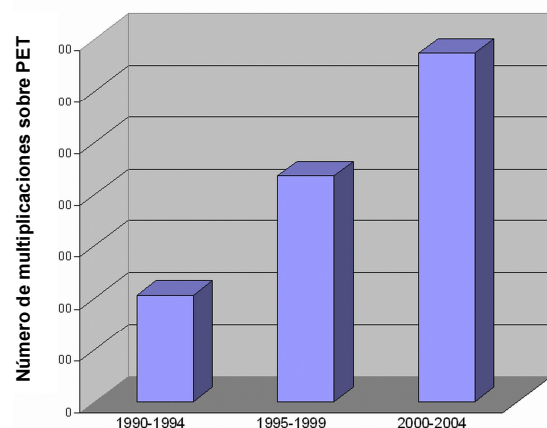


Figura G-1: Desarrollo de las publicaciones científicas sobre PET en revistas científicas sobre biomedicina (fuente: Medline) durante los últimos 15 años, lo que refleja la incidencia de esta técnica en la obtención de imágenes de casos de cáncer y otras enfermedades.

103. En los últimos decenios, los adelantos en la velocidad de las computadoras han promovido una revolución en la tecnología de obtención de imágenes con fines médicos. Se prevé que en el próximo decenio los departamentos de radiología más modernos adquieran dispositivos planos de obtención de imágenes, con lo cual dejarán de utilizar películas y concluirán la transición a la tecnología digital. El abandono del procesamiento químico de las películas es rentable, da lugar a importantes mejoras de la calidad y fiabilidad de las imágenes, y podría traducirse en una reducción general de la exposición de los pacientes a los rayos X utilizados con fines de diagnóstico. Estos adelantos, unidos a la naturaleza inherentemente digital de los sistemas de tomografía computadorizada, constituyen la base de un sistema electrónico de registro médico que podría contener todo el historial médico de cada paciente, incluidos todos los estudios de obtención de imágenes que se le hayan realizado a lo largo de su vida.

104. Un gran adelanto en la aplicación de tratamientos de medicina nuclear es el uso rutinario de anticuerpos monoclonales radiomarcados anti-CD20 para tratar linfomas, y péptidos radiomarcados para tratar especialmente tumores neuroendocrinos. Esto da inicio finalmente a una nueva era en la esfera de los tratamientos selectivos, que tienen considerablemente menos efectos secundarios que la quimioterapia convencional. La comunidad de la medicina nuclear también tiene a su disposición una amplia variedad de radiofármacos con efectos paliativos eficaces. Esos radiofármacos son especialmente útiles en los casos de metástasis en que no se puede aplicar la radioterapia, logrando así una mejora eficiente de la calidad de vida. Los anticuerpos terapéuticos radiomarcados están propiciando mejoras importantes en la atención de pacientes y, combinados con agentes quimioterapéuticos, un aumento de las tasas de supervivencia globales.

G.3. Dosimetría y radiofísica médica

105. La tecnología de vanguardia en el tratamiento del cáncer actualmente se llama "diseño de dosis" y se basa en los adelantos en la obtención de imágenes funcionales. La llegada de la obtención de imágenes por resonancia magnética (MRI) posibilitó la realización de estudios espectroscópicos o la adquisición de imágenes funcionales por resonancia magnética que revelaban las zonas del tumor con distintos niveles de actividad. Sin embargo, en los últimos años la PET se ha convertido en el motor principal de la obtención de imágenes funcionales. Actualmente es posible localizar las zonas de los tumores que podrían requerir dosis de radiación más altas, por ejemplo, porque las células parecen ser deficientes en oxígeno y por lo tanto resistentes a la radiación, o porque el suministro de sangre local

se está expandiendo rápidamente, lo que podría revelar el lugar donde se encuentra una enfermedad agresiva. Es casi seguro que, gracias a esta capacidad, las dosis se podrán modificar y administrar a cada una de las partes funcionales del tumor. El diseño de la dosis se podrá modificar en cada sesión terapéutica utilizando estudios de obtención de imágenes funcionales a fin de vigilar periódicamente la reacción del tumor.

G.4. Radiofármacos

106. El tecnecio 99m sigue siendo el radioisótopo más ampliamente utilizado en la medicina nuclear de diagnóstico en todo el mundo, con más de 40 000 procedimientos diarios. El uso de radiofármacos en la medicina nuclear de diagnóstico sigue aumentando a un ritmo del 10 al 15% anual.

107. El empleo de radiofármacos terapéuticos está aumentando y se están desarrollando muchos radiofármacos nuevos utilizando radionucleidos emisores de partículas. Varios radiofármacos basados en ytrio 90 utilizados en la terapia del cáncer y el tratamiento de la artritis se encuentran actualmente en la fase de ensayo clínico y se prevé que sus aplicaciones futuras sean amplias. El lutecio 177, radionucleido terapéutico ideal con un período de semidesintegración suficientemente prolongado para poder preparar y enviar fácilmente el producto acabado, está recabando atención.

G.5. Radiooncología

108. 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 las moléculas a las que están destinados de manera que se conserve su efecto radiosensibilizador en los tejidos cancerosos y se reduzca la toxicidad para los tejidos sanos. También se están realizando investigaciones sobre el control de la toxicidad retrasada de los modificadores químicos en los efectos de las radiaciones, así como la determinación de moléculas blanco que ayudan a que las células cancerosas no mueran después de su irradiación, y de blancos causantes de las radiolesiones en los tejidos sanos.

109. En los dos últimos decenios se ha asistido al desarrollo continuo de la braquiterapia, que consiste en colocar fuentes radiactivas selladas muy cerca del tejido blanco o en contacto con él. De este modo, se pueden administrar altas dosis de radiación en condiciones de seguridad a volúmenes blanco localizados durante períodos breves. Las novedades en las fuentes de tasa de dosis alta, la tecnología de control remoto, las técnicas quirúrgicas y los programas informáticos de planificación de los tratamientos han contribuido al rápido desarrollo de esta eficaz modalidad de tratamiento. En particular, el reciente desarrollo de fuentes de tasa de dosis alta de cobalto 60 podría posibilitar la administración de braquiterapia de tasa de dosis alta sin necesidad de sustituir las fuentes con tanta frecuencia como en el caso de otras fuentes.

H. EL AGUA Y EL MEDIO AMBIENTE

H.1. Recursos hídricos

H.1.1. Técnicas de hidrología isotópica

110. La gestión de las aguas subterráneas es una cuestión fundamental para el desarrollo humano sostenible, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. La creciente demanda de agua y la disponibilidad (y en muchos casos la calidad) limitada de los recursos de aguas superficiales han propiciado el rápido desarrollo de las aguas subterráneas para el suministro de agua, el riego y la industria. A fin de lograr una planificación racional, el conocimiento adecuado de las propiedades de los acuíferos (origen de las aguas subterráneas, tasas de recarga y renovación, vulnerabilidad a la contaminación e interconexiones entre las masas de agua) es un requisito previo para establecer estrategias de desarrollo acertadas.

111. El Organismo ha iniciado una actividad encaminada a recopilar y difundir datos isotópicos de los acuíferos y los ríos de todo el mundo, datos que también se están utilizando para confeccionar mapas temáticos de aguas fósiles destinados a ayudar a los encargados de tomar decisiones a adoptar mejores prácticas en cuanto a la gestión de las aguas subterráneas.

112. El desarrollo, en el decenio de 1950, de un espectrómetro de masas de doble entrada y fuente de gas anunció un aumento fulminante del uso de los isótopos en los ámbitos de la hidrología y la geología. Los nuevos adelantos tecnológicos para realizar análisis isotópicos de muestras hidrológicas bien podrían revolucionar el uso de los isótopos en la gestión de los recursos hídricos. Se ha puesto a disposición un instrumento portátil basado en una técnica láser para su uso en la mesa de trabajo o sobre el terreno. Este instrumento relativamente barato, cuyo uso no requiere grandes habilidades y de bajo costo, en comparación con el espectrómetro de masas de doble entrada, puede ser utilizado tanto por investigadores como por especialistas con costos operacionales mínimos, y permitiría superar la barrera actual que impide hacer un uso más amplio de los isótopos en la esfera de la hidrología debido a la dificultad de disponer fácilmente de análisis isotópicos. El uso de la máquina de separación isotópica por láser podría dar lugar a un mayor número de mediciones isotópicas en todo el mundo, lo que ayudaría a suministrar la información necesaria para abordar algunos de los principales desafíos en el ámbito de la hidrogeología, como la comprensión de la recarga de los acuíferos y su gestión, la determinación de modelos de flujo de aguas subterráneas o el establecimiento de las relaciones existentes entre las aguas superficiales y subterráneas.

H.1.2. Desalación

113. Se está avanzando continuamente en el uso de la energía nuclear para desalar el agua de mar, debido a la creciente demanda mundial de agua dulce y a los adelantos en los reactores de pequeña y mediana potencia, que podrían ser más apropiados para la desalación que los reactores de gran potencia. En la esfera de la desalación nuclear, el Japón ha acumulado más de 143 años-reactor de experiencia y Kazajstán acumuló 26 años-reactor antes de poner en régimen de parada el reactor rápido Aktau en 1999.

114. La India sigue adelante con la plena puesta en servicio de la planta de demostración de desalación nuclear en Kalpakkam, donde durante varios años se ha utilizado la ósmosis inversa para la desalación y en 2006 está previsto comenzar a usar el proceso de evaporación instantánea en etapas múltiples. En 2004, la India puso en servicio una planta de evaporación a baja temperatura en el reactor de investigación de agua pesada CIRUS en Trombay y utilizó el calor residual del moderador para producir agua de alta calidad a partir de agua de mar. En 2005, el Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea (KAERI) solicitó un permiso de construcción de un prototipo de 65 MW(t)

a escala 1:5 de reactor modular avanzado integrado en el sistema (SMART), con una unidad de desalación. El Pakistán ha comenzado las obras para el acoplamiento de una planta de destilación en etapas múltiples al actual reactor de agua pesada a presión en la central nuclear de Karachi, con fines de demostración. En China se está instalando un sistema de ensayo en el Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías para validar los parámetros termohidráulicos de un proceso de destilación de efecto múltiple. En Egipto se prevé finalizar en 2006 la construcción de la instalación de ensayo de ósmosis inversa de precalentamiento.

H.2. Medio ambiente

H.2.1. Remoción de minas

115. Las investigaciones sobre la aplicabilidad de las técnicas nucleares a la detección de explosivos, incluidas las minas terrestres, han revelado que los objetivos de menos de 100 g no pueden detectarse con suficiente fiabilidad, especialmente si el terreno está mojado o húmedo, y que la técnica basada en la retrodispersión de neutrones es útil solamente en las zonas áridas, porque lo que se detecta en el explosivo es el componente de hidrógeno. Es difícil seleccionar una única técnica nuclear que pueda considerarse como superior o como la técnica de primera línea de una inspección. Las técnicas nucleares sirven más para la “confirmación”, después de una primera identificación de una muestra/zona sospechosa no específica. En el caso de esta última, también se requieren algunas técnicas no nucleares. Por esta razón, varios grupos de países desarrollados y en desarrollo, bajo la coordinación del Organismo, están realizando nuevas investigaciones para estudiar la aplicación de una combinación de técnicas y la utilización de neutrones de diferentes energías (así como también fuentes de neutrones idóneas para las aplicaciones sobre el terreno).

H.2.2. Radionucleidos trazadores de la interacción entre la circulación oceánica y el clima

116. La circulación oceánica es uno de los procesos clave que controlan nuestro clima. La capacidad para utilizar radionucleidos como trazadores de los procesos oceánicos está impulsada, en gran medida, por los recientes adelantos en las técnicas limpias de muestreo y análisis, así como por las mediciones de espectrometría de masas de alta precisión. Estas técnicas han sido uno de los incentivos del programa de investigación internacional GEOTRACES, recientemente puesto en marcha, que tiene por objeto coordinar las investigaciones sobre el ciclo oceánico de los oligoelementos y sus isótopos. Se espera que este programa aumente considerablemente la comprensión del comportamiento de los radionucleidos en los océanos.

H.2.3. Bioacumulación en las cadenas alimentarias marinas

117. Los organismos acuáticos pueden acumular radionucleidos y metales, y su concentración puede aumentar si la excreción es menor que la absorción; este proceso se llama bioacumulación y puede incrementar la toxicidad de un contaminante dentro de la cadena alimentaria. Algunos estudios han demostrado que puede darse bioacumulación en el caso de radionucleidos tóxicos y contaminantes metálicos, como el polonio, el selenio, el zinc y el cadmio. Al parecer, los metales ligados a las proteínas presentes en la biota tienen más posibilidades de bioacumularse, pero hasta el momento no existe ninguna evaluación sistemática de la bioacumulación de diversos metales en las cadenas alimentarias marinas. Mediante el uso de radiotrazadores, el Laboratorio de Estudios del Medio Ambiente Marino del Organismo ha iniciado las investigaciones sobre una serie de metales para medir las posibilidades de que se bioacumulen en distintas cadenas alimentarias marinas.

H.2.4. Comprensión de los ciclos del carbono mediante análisis isotópicos de compuestos específicos

118. Los océanos contienen una cantidad de dióxido de carbono (CO_2) 50 veces mayor que la que se encuentra en la atmósfera, y cada año absorben entre el 30 y el 40% del CO_2 generado por el ser humano al quemar combustibles fósiles. Así pues, los océanos desempeñan una función clave en el equilibrio de la masa global del carbono. Los isótopos del carbono (carbono 14 y carbono 13) han hecho que los geoquímicos puedan seguir los ciclos globales del CO_2 , y esas técnicas serán valiosas para evaluar las opciones futuras de mitigación. Los químicos especializados en isótopos han logrado miniaturizar y fusionar estas técnicas isotópicas del carbono en cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas de relación isotópica (GC-IRMS), posibilitando los análisis de las razones isotópicas del carbono en menos de una millonésima de un gramo de compuesto orgánico, lo que ha permitido la determinación de muchas más fuentes, trayectorias y destinos finales de compuestos y contaminantes orgánicos encontrados en el medio ambiente.