

Conferencia General

GC(51)/INF/3

Fecha: 11 de julio de 2007

Distribución general

Español

Original: Inglés

Quincuagésima primera reunión ordinaria

Punto 17 del orden del día provisional

(GC(51)/1)

Examen de la tecnología nuclear 2007

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a las peticiones de los Estados Miembros, la Secretaría presenta cada año un *Examen de la tecnología nuclear* exhaustivo; en el informe actual se destacan los acontecimientos importantes ocurridos principalmente en 2006.
- El *Examen de la tecnología nuclear 2007* pasa revista a las siguientes esferas: aplicaciones eléctricas, 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 encuentra, en inglés, más información relacionada con el *Examen de la tecnología nuclear 2007* sobre los progresos realizados en el diseño y el desarrollo tecnológico de los reactores de pequeña y mediana potencia; las tendencias en la esfera del combustible nuclear para los tipos actuales de reactores de potencia; el desarrollo sostenible: el camino hacia el período de sesiones de la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible (CDS-15); desarrollo de materiales estructurales del núcleo del reactor resistentes a la radiación; radiofármacos: producción y disponibilidad; uso eficiente del agua en la agricultura: función de las técnicas nucleares e isotópicas; y el empleo de isótopos para comprender los aspectos relacionados con los océanos y el cambio climático.
- En el *Informe Anual para 2006* (GC(51)/5), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el *Informe de Cooperación Técnica para 2006* (GC(51)/INF/4) también se puede obtener información sobre las actividades del OIEA relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, observaciones específicas de la Junta y otras recibidas de los Estados Miembros.

Índice

A.	Aplicaciones energéticas	3
A.1.	La energía nucleoelectrica en la actualidad	3
A.2.	Proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica	5
A.3.	La parte inicial del ciclo del combustible	6
A.4.	Combustible gastado y reprocesamiento	8
A.5.	Desechos y clausura.....	9
A.6.	Otros factores que afectan al futuro de la energía nucleoelectrica	10
A.6.1.	Desarrollo sostenible y cambio climático	10
A.6.2.	Aspectos económicos.....	10
A.6.3.	Seguridad	11
A.6.4.	Resistencia a la proliferación	12
B.	Fisión avanzada y fusión	12
B.1.	Fisión avanzada.....	12
B.1.1.	Reactores de agua ligera.....	12
B.1.2.	Reactores de agua pesada.....	13
B.1.3.	Reactores refrigerados por gas	14
B.1.4.	Reactores rápidos refrigerados por metal líquido	14
B.1.5.	Sistemas accionados por acelerador (SAA)	15
B.1.6.	El INPRO y el GIF	16
B.2.	Fusión	16
C.	Datos atómicos y nucleares	17
D.	Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación.....	18
D.1.	Aceleradores	18
D.2.	Reactores de investigación	18
E.	Aplicaciones radioisotópicas y tecnología de irradiación	21
E.1.	Aplicaciones radioisotópicas en la salud.....	21
E.2.	Tecnología de irradiación.....	22
E.2.1.	Injertos de polímeros por irradiación	22
F.	Técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación	23
F.1.	Isótopos para localizar contaminantes en los suelos	23
F.2.	Mejora de los cultivos	24
F.3.	Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias	24
F.4.	Aplicación de la técnica de los insectos estériles para luchar contra las plagas de insectos	25
F.4.1.	Aplicación de la TIE para luchar contra la mosca de la fruta.....	25
F.4.2.	Utilización de la TIE para luchar contra el gusano barrenador del ganado	26
F.4.3.	Utilización de la TIE para luchar contra los mosquitos.....	26
F.5.	Calidad e inocuidad de los alimentos	26
F.5.1.	Vigilancia de la inocuidad de los alimentos: medición de los residuos de plaguicidas	26
G.	Salud humana	27
G.1.	Adelantos en cardiología nuclear.....	27
G.2.	Últimos adelantos en radioterapia	27
G.3.	Nutrición.....	28
H.	El agua y el medio ambiente	29
H.1.	Datos isotópicos para la gestión de los recursos hídricos.....	29
H.2.	El medio ambiente marino y terrestre.....	30

H.2.1. Microanálisis de partículas radiactivas en los sedimentos marinos	30
H.2.2. Utilización de radiotrazadores para garantizar la inocuidad de los alimentos marinos	30
H.3. Vigilancia de la contaminación atmosférica	31
H.4. El radón en la atmósfera.....	32
H.5. Los materiales de referencia y la calidad analítica	32

Examen de la tecnología nuclear 2007

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. Durante el año 2006 el número de actividades en el ámbito de la energía nucleoelectrónica fue en aumento. En algunos países se anunciaron importantes planes de expansión y, en otros, planes de introducción de la energía nucleoelectrónica. El año comenzó con los anuncios de la Federación de Rusia y los Estados Unidos de América de propuestas internacionales relativas al ciclo del combustible en previsión de una expansión considerable de la energía nucleoelectrónica en todo el mundo. En enero, 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 OIEA”. En febrero, los Estados Unidos propusieron crear una Alianza Mundial por la Energía Nuclear, cuyos objetivos serían desarrollar tecnologías de reciclado avanzadas que no separen el plutonio puro; 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 a las necesidades de los países en desarrollo.
2. Las nuevas proyecciones a mediano plazo del OIEA y la Agencia Internacional de la Energía presentan un panorama de oportunidades de expansión nuclear importante, si bien persiste una considerable incertidumbre. Varios países han anunciado planes de gran expansión: China, la India, el Japón, el Pakistán, la Federación de Rusia y la República de Corea. En las solicitudes de licencia previstas anunciadas por empresas y consorcios estadounidenses se mencionan unos 25 reactores nuevos. En el Canadá se presentaron dos solicitudes de preparación de emplazamientos. Un importante estudio sobre energía realizado por el Reino Unido concluyó que las nuevas centrales nucleares contribuirían considerablemente a alcanzar los objetivos nacionales de política energética. Las compañías eléctricas de Estonia, Lituania y Letonia iniciaron un estudio conjunto de viabilidad de una nueva central nuclear que abastezca a los tres países, y Belarús, Egipto, Indonesia, Nigeria y Turquía anunciaron las medidas que están tomando para construir sus primeras centrales nucleares.
3. Al final de 2006 había en todo el mundo 435 reactores nucleares de potencia en funcionamiento, cuya potencia total ascendía a 370 GW(e). A lo largo del año se conectaron a la red dos nuevos reactores y se retiraron ocho, lo que se tradujo en un pequeño aumento neto de la potencia nuclear mundial en 2006, habida cuenta del aumento de la capacidad de los reactores existentes, de 1 443 MW(e). Se iniciaron tres construcciones y se reanudaron los trabajos de construcción de una central en la Federación de Rusia; las obras en construcción al final del año generaban una potencia total de 23 641 MW(e).
4. Los precios al contado del uranio siguieron aumentando en 2006 hasta alcanzar nueve veces su mínimo histórico registrado en 2000, debido en parte a las crecientes expectativas en relación con la energía nucleoelectrónica. Los gastos de exploración anuales han aumentado a más del triple desde 2001.
5. El Brasil abrió su nueva instalación de enriquecimiento de Resende, y comenzaron las obras de construcción de la Instalación nacional de enriquecimiento de los Estados Unidos y la planta de enriquecimiento Georges Besse II (Francia). Las pruebas finales para la puesta en servicio de la nueva planta de reprocesamiento de Rocazo (Japón) comenzaron en marzo.

6. El único repositorio geológico en funcionamiento en todo el mundo, la Planta piloto de aislamiento de desechos de los Estados Unidos, recibió de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos la primera renovación de su certificado desde que se inauguró en 1999. Francia aprobó nueva legislación que establece como objetivos solicitar una licencia de construcción de un repositorio geológico profundo con miras a inaugurarlo para 2025, y de un prototipo de reactor para 2020, entre otras cosas con objeto de someter a ensayo la transmutación de radioisótopos de período largo. La Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares SKB presentó una solicitud para construir una planta de encapsulación en Oskarshamn, que constituye el primer paso para la disposición final.

7. En lo tocante a los diseños de reactores avanzados, el diseño AP-1000 de Westinghouse, que está provisto de sistemas de seguridad pasiva, recibió un certificado de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos en 2006. El número de miembros del Proyecto internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) ascendió a 28 con el ingreso de Belarús, el Japón, Kazajstán y Eslovaquia, y el del Foro Internacional de la Generación IV (GIF) llegó a 13 con la incorporación de China y Rusia. El INPRO entró en una segunda fase tras ultimar una metodología que los Estados Miembros pueden utilizar para evaluar y seleccionar sistemas de energía nuclear innovadores (SENI) para el desarrollo. En la Fase 2 del INPRO se analizan enfoques institucionales e infraestructurales innovadores a fin de establecer SENI, evaluaciones conjuntas de SENI y proyectos de colaboración entre Estados Miembros. En 2006, los miembros del GIF firmaron cuatro ‘acuerdos sobre sistemas’ que abarcaban la colaboración en materia de sistemas de reactores rápidos refrigerados por sodio, sistemas de reactores rápidos refrigerados por gas, sistemas de reactores de muy alta temperatura refrigerados por gas y sistemas de reactores refrigerados por agua supercrítica. Los acuerdos constituyen el marco de participación de los países miembros del GIF en actividades de investigación y desarrollo de varias tecnologías.

8. Está aumentado la demanda de bases de datos atómicos y nucleares más exactas que sirvan de apoyo a las aplicaciones nucleares en las esferas de la investigación, la energía y la producción de radionucleidos terapéuticos en medicina nuclear. Las aplicaciones radioisotópicas en el sector de la atención de salud están aumentando, así como las necesidades de emisores de positrones para su uso en la realización de tomografías con emisión de positrones (PET).

9. La celebración de tres importantes reuniones internacionales en que se abordaron el tratamiento por radiación, la radioquímica, y la producción y el uso de polímeros mostró el interés que existe por la tecnología de irradiación. El injerto de polímeros por radiación ofrece técnicas de fabricación más baratas para una amplia gama de aplicaciones, que van desde las pilas de combustible hasta la medicina y la biotecnología.

10. Las técnicas nucleares e isotópicas siguen desempeñando funciones importantes en muchos aspectos de la alimentación y la agricultura. Cada vez se utilizan más los isótopos para localizar contaminantes en los suelos, en particular, los radionucleidos de las precipitaciones radiactivas de la época en que se realizaban ensayos de armas nucleares. Las técnicas de inducción de mutaciones para el fitomejoramiento, que se están beneficiando de la metodología de secuenciación de los genomas perfeccionada, brindan la posibilidad de aumentar el número de variedades de cultivos que son tolerantes a las condiciones difíciles. La productividad del ganado está mejorando gracias al empleo de isótopos estables que permiten conocer mejor la absorción de nutrientes de los animales y optimizar los regímenes alimentarios. Se está extendiendo el uso de la técnica de los insectos estériles, a cuyo respecto se cuenta de algunos éxitos y nuevas instalaciones para la producción de moscas estériles.

11. Se están logrando avances en materia de cardiología nuclear gracias a las nuevas técnicas de formación de imágenes que permiten hoy en día evaluar enfermedades en fases muy tempranas. Estas mismas técnicas de formación de imágenes combinadas con instrumentos informáticos sofisticados están propiciando rápidos adelantos en radioterapia al presentar, entre otras ventajas, la capacidad de administrar dosis exactas a los órganos que se mueven con la respiración del paciente y reducir las dosis que reciben los tejidos sanos adyacentes. En el ámbito de la nutrición, los programas en que se utilizan técnicas isotópicas estables se están beneficiando del mayor acceso a equipos analíticos que pueden emplearse para evaluar la composición corporal y la ingesta de leche materna en los lactantes.

12. La mejora de la comprensión del ciclo del agua es un elemento clave en la gestión sostenible de los recursos hídricos. La medición del contenido isotópico del agua de distintos orígenes (precipitaciones, aguas subterráneas, etc.) ayuda a entender el ciclo del agua y el clima, y los países se esfuerzan cada vez más por ampliar la disponibilidad de datos isotópicos. Estos esfuerzos fortalecerán aún más la Red Mundial sobre Isótopos en las Precipitaciones, que constituye un instrumento de interpretación de datos nacionales y locales sobre isótopos.

13. En estudios sobre el medio ambiente, los radiotrazadores constituyen instrumentos rentables para analizar el grado en que los organismos marinos absorben metales tóxicos y, por consiguiente, contribuyen a los estudios sobre inocuidad de los alimentos marinos y a la mejora de su calidad. En los estudios encaminados a determinar la composición y el origen de los contaminantes atmosféricos también se están utilizando técnicas nucleares tales como los análisis de fluorescencia de rayos X y activación neutrónica, y cada vez se emplean más las mediciones del radón, gas radiactivo natural, para estudiar la atmósfera, lo que contribuye al programa Vigilancia de la Atmósfera Global de la Organización Meteorológica Mundial.

A. Aplicaciones energéticas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

14. A finales de 2006 había en todo el mundo 435 reactores nucleares de potencia en funcionamiento, que generaban una potencia total de 370 GW(e) (véase el cuadro A-1). En 2006 la energía nucleoelectrónica proporcionó aproximadamente el 15% de la electricidad mundial.

15. En 2006 se conectaron a la red dos nuevos reactores, uno en China y uno en la India, lo que contrasta con las cuatro nuevas conexiones realizadas en 2005 (más la reconexión de un reactor abandonado) y las cinco nuevas conexiones en 2004 (más una reconexión). En 2006 se retiraron de servicio ocho reactores nucleares de potencia: dos en Bulgaria, cuatro en el Reino Unido, uno en Eslovaquia y uno en España. Esto contrasta con dos retiradas de servicio en 2005 y cinco en 2004. Habida cuenta del aumento de la capacidad de los reactores existentes, el efecto fue un pequeño aumento neto de la potencia nuclear mundial en 2006 de 1 443 MW(e).

16. En 2006 se iniciaron tres construcciones: Lingao-4 (1000 MW(e)) y Qinshan II-3 (610 MW(e)) en China, y Shin Kori-1 (960 MW(e)) en la República de Corea. Además, se reanudaron los trabajos de construcción de Beloyarsk-4, en Rusia.

17. En 2006 se iniciaron tres trabajos de construcción y se reanudó la construcción de Beloyarsk-4, mientras que en 2005 fueron tres los trabajos de construcción iniciados y se reanudó la construcción de dos reactores. En 2004 se iniciaron dos construcciones y se reanudó la construcción de dos reactores más.

18. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguieron centradas en Asia. Como se indica en el cuadro A-1, de los 29 reactores en construcción, 17 estaban en Asia. A finales del año, 26 de los últimos 36 reactores que se han conectado a la red se encontraban en Asia.

19. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) aprobó otras ocho prórrogas de licencia de 20 años cada una (equivalentes a una vida útil total autorizada de 60 años para cada central nuclear), elevando a 47 el número total de prórrogas de licencias aprobadas al final del año. En los Países Bajos, el Gobierno concedió una prórroga de 20 años a la central nuclear de Borssele, otorgándole una licencia de vida útil total autorizada de 60 años. El Gobierno también estableció condiciones para la construcción de nuevas centrales nucleares, lo que supone un cambio respecto de la política anterior del país encaminada a eliminar gradualmente la energía nucleoelectrónica. La Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) francesa aprobó con condiciones la explotación de veinte reactores de agua a presión de 1 300 MW(e) de Electricité de France por diez años más, lo que

equivale actualmente a un periodo total autorizado de 30 años. En el Canadá, Point Lepreau recibió una renovación de licencia de tres años, válida hasta 2011.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 1 de enero de 2007)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2006		Experiencia operacional total hasta 2006	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	17	20 339			158,7	31,8	700	5
ARGENTINA	2	935	1	692	7,2	6,9	56	7
ARMENIA	1	376			2,4	42,0	32	8
BÉLGICA	7	5 824			44,3	54,4	212	7
BRASIL	2	1 901			13,0	3,3	31	3
BULGARIA	2	1 906	2	1 906	18,2	43,6	141	3
CANADÁ	18	12 610			92,4	15,8	528	1
CHINA	10	7 572	4	3 610	51,8	1,9	66	7
COREA, REPÚBLICA DE	20	17 454	1	960	141,2	38,6	279	8
ESLOVAQUIA	5	2 034			16,6	57,2	118	7
ESLOVENIA	1	666			5,3	40,3	25	3
ESPAÑA	8	7 450			57,4	19,8	245	6
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	103	99 257			788,3	19,4	3 188	2
FEDERACIÓN DE RUSIA	31	21 743	5	4 525	144,6	15,9	901	4
FINLANDIA	4	2 696	1	1 600	22,0	28,0	111	4
FRANCIA	59	63 260			429,8	78,1	1 523	2
HUNGRÍA	4	1 755			12,5	37,7	86	2
INDIA	16	3 577	7	3 112	15,6	2,6	267	7
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL			1	915				
JAPÓN	55	47 587	1	866	291,5	30,0	1 276	8
LITUANIA	1	1 185			7,9	72,3	40	6
MÉXICO	2	1 360			10,4	4,9	29	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,3	3,5	62	0
PAKISTÁN	2	425	1	300	2,6	2,7	41	10
REINO UNIDO	19	10 965			69,4	18,4	1 400	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 323			24,5	31,5	92	10
RUMANIA	1	655	1	655	5,3	9,0	10	6
SUDÁFRICA	2	1 800			10,1	4,4	44	3
SUECIA	10	9 097			65,1	48,0	342	6
SUIZA	5	3 220			26,4	37,4	158	10
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	84,9	47,5	323	6
Total ^{b, c}	435	369 682	29	23 641	2 660,9	15%	12 599	1

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

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

- 6 unidades, 4 921 MW(e) en explotación; 2 unidades, 2 600 MW(e) en construcción;
- 38,3 TW·h de generación de electricidad nuclear, lo que representa el 19,5% del total de electricidad producida en 2006;
- 152 años y un mes de experiencia operacional total al final de 2006.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años) y Kazajstán (25 años y 10 meses).

A.2. Proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica

20. En 2006, el OIEA¹ y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) publicaron en el documento *World Energy Outlook 2006* (WEO 2006)² una actualización de las proyecciones de la expansión de la energía nucleoelectrica hasta 2030. El OIEA da una proyección alta y una proyección baja en relación con la energía nucleoelectrica. En el *World Energy Outlook 2006* figuran un escenario de referencia y un escenario alternativo en el que se presuponen medidas adicionales encaminadas a mejorar la seguridad energética y mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

21. En 2005, la AIE publicó otro estudio con siete escenarios que se prolongan hasta 2050³. Entre ellos figuran un escenario de referencia y seis “escenarios de tecnologías aceleradas”. En estos escenarios se examinan opciones tecnológicas para limitar o invertir el aumento global de las emisiones de CO₂ y el consumo de petróleo. Así pues, las tres publicaciones juntas presentan once escenarios. Sus proyecciones relativas a la energía nucleoelectrica se resumen en la figura A-1.

22. En la figura A-1, la proyección baja del OIEA parte del supuesto de que no se construyen nuevas centrales nucleares además de las que están en construcción o planificadas en firme actualmente, y que las centrales nucleares antiguas se retiran del servicio según lo previsto. La generación de electricidad nuclear dentro de esta proyección aumenta hasta alcanzar apenas 3 100 TWh en 2020 (1,1% anual) y básicamente se mantiene así hasta 2030. La proyección alta del OIEA incluye nuevos proyectos nucleares planificados y propuestos razonables, además de los que ya están firmemente proyectados. Esta proyección muestra un aumento constante hasta alcanzar 5 040 TWh en 2030 (2,6% anual).

23. Estos totales globales ocultan diferencias regionales, en particular en la proyección baja, en la que la generación de electricidad nuclear en Europa occidental se reduce casi en un 60% entre 2005 y 2030, ya que el ritmo de las retiradas de servicio proyectadas es mayor que el de las nuevas construcciones. Pero la generación de energía nucleoelectrica en el Lejano Oriente aumenta un 80%, y en Europa oriental casi un 50%. En la proyección alta, la generación de electricidad nuclear aumenta en todas las regiones. En ambas proyecciones, los lugares donde más se construye son el Lejano Oriente, Europa oriental, América del Norte y el Oriente Medio/Asia sudoriental, en ese orden.

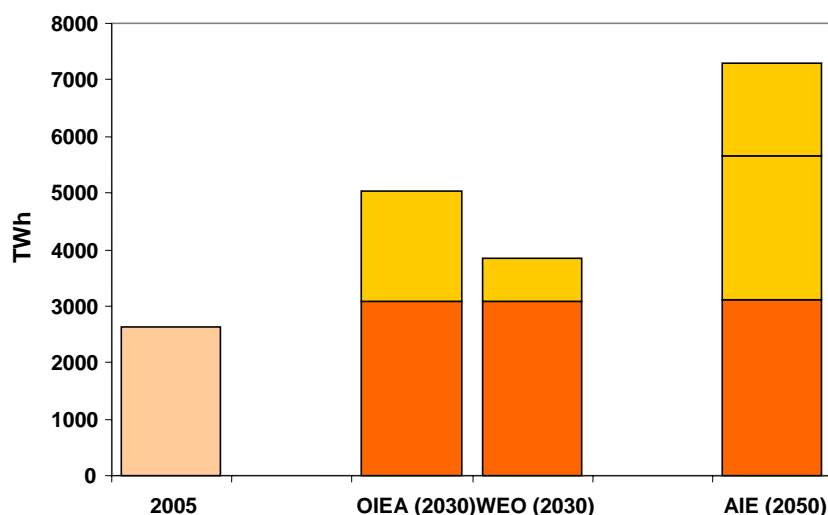


Fig. A-1. Generación de electricidad nuclear a escala mundial en 2005, y valores de las proyecciones para 2030 y 2050 según tres estudios (naranja oscuro = bajas; amarillo-naranja = altas; beige = históricas).

¹ OIEA, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, Colección de Datos de Referencia N° 1 (RDS-1), OIEA, Viena, julio de 2006.

² AIE, *World Energy Outlook 2006*, AIE, París, 2006.

³ AIE, *Perspectivas sobre Tecnología Energética: Escenarios y Estrategias hasta 2050*, AIE, París, 2006.

24. El escenario de referencia del WEO es aquel en que nada cambia y que parte de la continuación de las políticas y tendencias actuales. La generación de electricidad nuclear proyectada en este escenario es casi idéntica a la de la proyección baja del OIEA. Se prevé que las medidas del escenario alternativo encaminadas a mejorar la seguridad energética y mitigar las emisiones de CO₂ estimulen la generación de electricidad nuclear pero, como se muestra en la figura, no lo suficiente para igualar la proyección alta del OIEA.

25. En cuanto a los escenarios de la AIE en 2050, a la derecha de la figura A-1, la parte inferior de la banda corresponde al escenario de referencia y a un “escenario nuclear bajo”. Se trata fundamentalmente de ampliaciones del escenario de referencia del WEO 2006. La parte superior de la banda corresponde al escenario TECH Plus, en el que se presuponen reducciones de gastos aceleradas en relación con las pilas de combustible, las energías renovables, los biocombustibles y la energía nucleoelectrónica. En este escenario, la generación de electricidad nuclear sigue aumentando hasta 2050 básicamente al mismo ritmo que en la proyección alta del OIEA, y su parte en la generación de electricidad en el mundo alcanza el 22%. Los otros cuatro escenarios de la AIE se concentran alrededor del nivel de la barra negra de la figura, a unos 5 650 TWh, o una tasa de crecimiento medio del 1,7% a partir de 2005.

26. Juntas, estas nuevas proyecciones y escenarios presentan un panorama de posibilidades de expansión nuclear importante, si bien persiste una incertidumbre considerable. Varios acontecimientos en 2006 indican que el interés renovado por la energía nucleoelectrónica podría dar lugar en un futuro razonablemente próximo a un incremento de la construcción. Algunos de esos acontecimientos son los planes de expansión anunciados en 2006 por el Japón y la Federación de Rusia, así como los planes de expansión anteriormente anunciados de China, la India, el Pakistán y la República de Corea. También lo son el gran número de solicitudes de licencia combinada que tienen previsto presentar empresas y consorcios de los Estados Unidos de América y que corresponden, en conjunto, a unos 25 nuevos reactores, dos solicitudes de preparación de emplazamiento en el Canadá y la conclusión del estudio sobre energía del Reino Unido según el cual las nuevas centrales nucleares contribuirán de forma importante a alcanzar los objetivos nacionales en materia de política energética. También forman parte de los acontecimientos un estudio conjunto de viabilidad iniciado por compañías eléctricas de Estonia, Lituania y Letonia de una nueva central nuclear que abastezca a los tres países, y los anuncios por Belarús, Egipto, Indonesia, Nigeria y Turquía sobre las medidas que están adoptando en relación con sus primeras centrales nucleares.

A.3. La parte inicial del ciclo del combustible⁴

27. Debido en parte al renovado interés por la energía nucleoelectrónica, los precios al contado del uranio siguieron aumentando en 2006 y alcanzaron a finales del año los 72 dólares/lb de U₃O₈, precio más de diez veces superior a su mínimo histórico de diciembre de 2000.⁵ La exploración y la explotación de minas han comenzado a seguir esa tendencia con un aumento superior al triple de los costos de explotación entre 2001 y 2005.

28. La estimación más reciente de los recursos mundiales de uranio publicada por la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la OCDE y el OIEA en 2006, en el documento *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*, muestra que, si bien es probable que se disponga de recursos de uranio considerables, se estima que será necesaria una importante explotación de las minas para convertir el uranio presente en la tierra en torta amarilla. En el cuadro A-2 se resume la posible longevidad de los recursos de uranio convencionales del mundo. Con respecto al actual ciclo del combustible de LWR

⁴ En el “Examen de la tecnología nuclear 2007”, en el sitio web IAEA.org, figura información adicional relacionada con este tema. Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la parte inicial del ciclo del combustible en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

⁵ No obstante, la mayor parte del uranio se compra en el marco de contratos a largo plazo, y entre 2000 y 2005 los precios del uranio a mediano y largo plazo sólo aumentaron entre el 20% y el 40%.

sin reprocesamiento y a un ciclo puro del combustible de reactores rápidos⁶, en el cuadro se estima el tiempo que durarían los recursos de uranio convencionales, 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 uranio para la generación de energía nucleoelectrica⁶

Reactor/ciclo del combustible	Años de producción mundial de electricidad nuclear al nivel de 2004 utilizando recursos convencionales conocidos	Años de producción mundial de electricidad nuclear al nivel de 2004 utilizando el total de recursos convencionales	Años de producción mundial de electricidad nuclear al nivel de 2004 utilizando el total de recursos convencionales y no convencionales
Ciclo actual del combustible sin reprocesamiento con reactores de agua ligera	85	270	675
Ciclo puro del combustible de reactores rápidos con reciclaje	5 000 – 6 000	16 000 – 19 000	40 000 – 47 000

29. El enriquecimiento del uranio fue un tema que recibió gran atención internacional en 2006. Al igual que con el uranio, el precio de las unidades de trabajo de separación (UTS) aumentó en un 45% aproximadamente entre 2001 y 2006. Es probable que la demanda del mercado sobrepase los niveles de potencia planificados después de 2013, momento en que vence el Acuerdo entre el Gobierno de los Estados Unidos de América y el Gobierno de la Federación de Rusia relativo a la disposición de uranio muy enriquecido extraído de armas nucleares⁷, y quizás antes si se experimenta un crecimiento rápido a corto plazo en la construcción de centrales nucleares. Es posible determinar nuevos aumentos importantes de potencia además de los que ya están planificados en firme, pero si el crecimiento de la potencia nuclear en particular se recupera, seguirán incrementándose tanto los precios de las UTS como los del uranio.

30. Ejemplos de la creciente atención que se presta al enriquecimiento del uranio fueron la apertura oficial de la instalación de Resende en el Brasil, el inicio de las obras de construcción de la Instalación nacional de enriquecimiento de los Estados Unidos y de la planta de enriquecimiento Georges Besse II en Francia, los planes anunciados por la Argentina, Australia y Sudáfrica encaminados a restablecer o estudiar programas nacionales de enriquecimiento, y la compra por la Compañía General Electric de los derechos de la tecnología avanzada de enriquecimiento del uranio basada en láser de Silex Systems, de Australia. Al mismo tiempo, el llamamiento del Presidente Putin a crear un sistema de centros internacionales que presten servicios relacionados con el ciclo del combustible nuclear, incluido el enriquecimiento, sin discriminaciones y bajo el control del OIEA, y el posterior establecimiento por la Federación de Rusia y Kazajstán de un centro internacional de enriquecimiento del uranio en Angarsk, así como varias otras propuestas para garantizar el suministro de uranio enriquecido en caso de interrupciones del suministro por razones políticas, han demostrado la voluntad de los Estados para elaborar nuevos enfoques internacionales en relación con el ciclo del combustible nuclear.

⁶ En los valores de la última fila del cuadro A-2 se supone que los reactores rápidos permiten básicamente utilizar todo el uranio 238 para obtener plutonio 239 y fabricar combustible, salvo pérdidas menores de material fisible durante el reprocesamiento y la fabricación de combustible. Los valores resultantes son más elevados que las estimaciones publicadas en un cuadro similar en el documento *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*. Estas últimas estimaciones parten del supuesto de que no todo el uranio 238 se utiliza para obtener plutonio 239 y fabricar combustible.

⁷ El acuerdo prevé que el uranio apto para la fabricación de armas procedente de las ojivas nucleares rusas desmanteladas se diluya y recicle para convertirlo en combustible que utilizarán principalmente las centrales nucleares estadounidenses.

31. En este contexto, durante la 50ª reunión de la Conferencia General del OIEA se celebró un evento especial consistente en una conferencia internacional titulada “Nuevo marco para la utilización de la energía nuclear en el siglo XXI: garantías de suministro y no proliferación”. En el informe del presidente del evento especial se recuerda el desafío que supone satisfacer las crecientes demandas energéticas mundiales mediante la posible expansión del uso de la energía nuclear, minimizando al mismo tiempo los riesgos de proliferación derivados de una mayor propagación de la tecnología nuclear de carácter estratégico, como el enriquecimiento del uranio y el reprocesamiento del plutonio. En la conferencia se estudiaron diversas sugerencias útiles presentadas recientemente en relación con nuevos enfoques del ciclo del combustible nuclear, que tienen por objetivo garantizar el suministro de combustible nuclear, como medida de apoyo del mercado comercial, en determinadas situaciones. La conferencia consideró estas propuestas recientes para garantizar el suministro de combustible nuclear basado en el uranio como una de las fases de la evolución más amplia y a más largo plazo de un marco multilateral que podría abarcar mecanismos de garantía de suministro tanto de uranio natural como poco enriquecido y de combustible nuclear, así como la gestión del combustible gastado. Los participantes admitieron que el establecimiento de un marco plenamente desarrollado y multilateral que sea equitativo y accesible para todos los usuarios de la energía nuclear, que actúen de conformidad con las normas de no proliferación nuclear acordadas, es una empresa compleja que probablemente requerirá un enfoque gradual. Se espera que la Secretaría tome en consideración los debates de la conferencia al elaborar sus propuestas para su examen por la Junta de Gobernadores del OIEA durante 2007.

A.4. Combustible gastado y reprocesamiento⁸

32. Las descargas de combustible gastado de los reactores de todo el mundo ascienden a unas 10 500 toneladas de metales pesados (t HM) anuales. Se están aplicando dos estrategias de gestión distintas en relación con el combustible nuclear gastado. La primera consiste en el reprocesamiento del combustible gastado (o su almacenamiento para su posterior reprocesamiento) a fin de extraer el material utilizable (uranio y plutonio) para fabricar nuevo combustible de mezcla de óxidos (MOX). Se ha reprocesado aproximadamente una tercera parte del combustible gastado descargado en todo el mundo. La segunda estrategia consiste en considerar el combustible gastado como un desecho y almacenarlo en espera de su disposición final. Sobre la base de los más de 50 años de experiencia acumulados hasta ahora en el almacenamiento seguro y eficaz de combustible gastado, existe un alto grado de confianza en las tecnologías de almacenamiento en húmedo y en seco, así como en su capacidad para hacer frente a un volumen cada vez mayor hasta que entren en funcionamiento repositorios finales para todos los desechos de actividad alta.

33. Hoy en día, China, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido reprocesan, o almacenan para su reprocesamiento futuro, la mayor parte de su combustible gastado. El Canadá, los Estados Unidos de América, Finlandia y Suecia han optado actualmente por la disposición final directa, aunque en febrero de 2006 los Estados Unidos de América anunciaron una Alianza Mundial por la Energía Nuclear (GNEP), que incluye el desarrollo de tecnologías avanzadas de reciclaje para su uso en los Estados Unidos.

34. La mayoría de los países no ha decidido aún qué estrategia adoptar. En la actualidad almacenan el combustible gastado y se mantienen al día de la evolución de ambas alternativas.

35. En marzo de 2006 comenzaron los ensayos finales para la puesta en servicio de la nueva planta de reprocesamiento de Rokkasho, en el Japón, con una duración prevista de 17 meses. El producto final de la planta de Rokkasho es un polvo de MOX que se produjo por primera vez en noviembre. Se prevé producir polvo de MOX a escala comercial en el segundo semestre de 2007. La capacidad

⁸ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas al combustible gastado y el reprocesamiento en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

máxima de reprocesamiento de la planta será de 800 toneladas de uranio anuales, suficiente para reprocesar el 80% del combustible gastado que se produce en el Japón por año. En China, se completó la puesta en servicio no radiactiva de la primera planta experimental de reprocesamiento del país. También se están desarrollando nuevos procesos de reciclaje, por ejemplo el proceso UREX+ en los Estados Unidos, para reciclar el combustible nuclear gastado, sin separar el plutonio puro, y fabricar combustible para reactores rápidos incineradores avanzados con los elementos transuránicos separados.

36. En 2006, se cargaron con carácter comercial aproximadamente 180 toneladas de combustible MOX de origen civil en más de 30 reactores de agua a presión (PWR) y dos reactores de agua en ebullición (BWR) en Alemania, Bélgica, Francia y Suiza. La proporción de conjuntos combustibles de MOX en el núcleo osciló entre el 25% y el 50%. No se prevé ningún aumento importante de las necesidades de combustible MOX hasta 2010, momento en que el Japón tiene previsto iniciar su programa “plutermal” para cargar combustible MOX en 16 a 18 reactores de potencia. En la India se han irradiado recientemente unos 50 haces de combustible MOX en un reactor de agua pesada a presión (PHWR 220) a escala experimental.

37. La planta de combustible MOX de Belgonucleaire en Dessel dejó de producir en agosto de 2006 y se prevé que su clausura haya finalizado en 2013. Como resultado de ello, quedan dos fabricantes importantes de combustible MOX en Francia y el Reino Unido.

A.5. Desechos y clausura⁹

38. Si bien los programas de repositorios de los Estados Unidos, Finlandia y Suecia siguen siendo los más avanzados, es poco probable que alguno de esos países tenga un repositorio en funcionamiento mucho antes de 2020. El único repositorio geológico en funcionamiento del mundo es la Planta piloto de aislamiento de desechos (WIPP) en los Estados Unidos de América. Desde 1999 ha aceptado desechos transuránicos de período largo generados por las investigaciones y la producción de armas nucleares, pero no desechos procedentes de centrales nucleares civiles. En 2006, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos aprobó la primera solicitud de renovación del certificado de la WIPP, presentada en 2004. Es preciso renovar el certificado cada cinco años. La nueva legislación de Francia en materia de gestión del combustible gastado y disposición final de desechos, en virtud de la cual se estableció el reprocesamiento del combustible gastado y el reciclaje de materiales utilizables como elementos de la política francesa, también estableció la disposición final geológica profunda como solución de referencia en relación con los desechos radiactivos de período largo y actividad alta. La legislación fija objetivos que hay que alcanzar para solicitar una licencia de construcción de un repositorio geológico profundo reversible antes de 2015 e inaugurar la instalación antes de 2025. También insta a poner en funcionamiento un prototipo de reactor rápido de cuarta generación para 2020 a fin de someter a ensayo la transmutación de radioisótopos de período largo (véase también el párrafo 60), entre otras tareas. También en 2006 el Comité de gestión de desechos radiactivos del Reino Unido llegó a la conclusión de que la mejor opción de disposición final para ese país es la disposición final geológica profunda, con un “sólido almacenamiento provisional” hasta que se seleccione un emplazamiento para un repositorio.

39. En noviembre, la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares SKB presentó una solicitud de permiso al Cuerpo de Inspectores de Energía Nucleoeléctrica de Suecia para construir una planta de encapsulamiento en Oskarshamn. La planta de encapsulamiento es el primer paso para la disposición final mediante el método KBS-3, según el cual el combustible se encapsula en recipientes de cobre y se depositan en el lecho rocoso a una profundidad de aproximadamente 500 metros. No se espera tener una decisión definitiva sobre la solicitud hasta después de 2009,

⁹ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a los desechos y la clausura en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

momento en que está previsto presentar la solicitud para un repositorio geológico profundo final. Se están realizando investigaciones sobre el emplazamiento en relación con un repositorio final cerca de Forsmark, en Osthhammar, y la zona de Laxemar, en Oskarshamn.

40. En 2006 finalizó la clausura de la central nuclear de Big Rock Point en los Estados Unidos de América y el emplazamiento se declaró rehabilitado. Así, en 2006 se clausuraron completamente nueve centrales eléctricas en el mundo y se autorizó el uso incondicional de sus emplazamientos. Diecisiete centrales han sido parcialmente desmanteladas y cerradas en condiciones de seguridad, 30 se hallan en fase de desmantelamiento antes de declarar finalmente el emplazamiento apto para otros usos, y 30 están siendo objeto de un desmantelamiento mínimo antes de su cierre a largo plazo.

A.6. Otros factores que afectan al futuro de la energía nucleoelectrica

A.6.1. Desarrollo sostenible y cambio climático¹⁰

41. La Comisión de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (CDS) mantuvo debates sobre la energía por primera vez en su noveno período de sesiones (CSD-9) en 2001, y todas las partes estuvieron de acuerdo en que “la decisión de optar por la energía nuclear incumbe a los países”. Si bien en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS) de 2002 se reafirmó esta conclusión, la CDS incluyó el tema de la energía en los programas de sus 14º y 15º períodos de sesiones. La CSD-14 en 2006 fue una “reunión de examen” para analizar las repercusiones de los cambios de las políticas energéticas y de los avances tecnológicos en los progresos realizados hacia el desarrollo sostenible. En la “reunión de política” correspondiente, la CSD-15, celebrada en mayo de 2007, no se acordó ningún nuevo texto sobre cuestiones energéticas, y se mantuvieron las decisiones alcanzadas en la CSD-9 y la CMDS como acuerdos operativos de la CDS en materia de energía.

42. 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 políticas distintas para cumplir los límites que les corresponden según 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 a las emisiones de GEI deberían hacer de la energía nucleoelectrica una opción cada vez más atractiva. Con respecto a la reducción de las emisiones tras el primer período de compromiso, en el 11º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (COP11), en 2005, se decidió iniciar los debates en un grupo de trabajo ad hoc que hasta la fecha se ha reunido tres veces, en mayo y noviembre de 2006 y en mayo de 2007. Los debates se encuentran aún en una fase temprana y no se ha comenzado todavía a abordar detalles como la actual exclusión de proyectos sobre energía nucleoelectrica del mecanismo para un desarrollo limpio y de la aplicación conjunta.

A.6.2. Aspectos económicos

43. Las centrales nucleares tienen una estructura de costos centrada en los desembolsos iniciales, lo que significa que su construcción es relativamente costosa, pero su funcionamiento relativamente económico. Así pues, las centrales nucleares en funcionamiento bien gestionadas siguen siendo, en general, una fuente de electricidad rentable y competitiva. Sin embargo, en el caso de las nuevas construcciones, la competitividad económica de la energía nucleoelectrica depende de las alternativas disponibles, la demanda global de electricidad en un país y la velocidad a la que aumente, la estructura

¹⁰ Se puede acceder a información adicional en los documentos relacionados con el *Examen de la tecnología nuclear 2007* en el sitio web IAEA.org. Es posible consultar información más detallada acerca de las actividades del OIEA 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/Anrep2006>) y en la dirección <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>.

del mercado y el entorno de inversiones, las limitaciones ambientales, y los riesgos de inversión debidos a posibles retrasos o cambios a nivel político o de reglamentación. Así pues, la competitividad económica varía según los países y las situaciones.

44. En el Japón y la República de Corea, el costo relativamente alto de las alternativas es beneficioso para la competitividad de la energía nucleoelectrica. En la India y China, el rápido aumento de las necesidades energéticas fomentan el desarrollo de todas las opciones energéticas. En Europa, los elevados precios de la electricidad, del gas natural y los límites a las emisiones de GEI de conformidad con el Régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea han mejorado la viabilidad comercial para las centrales nucleares nuevas. En los Estados Unidos de América, la Ley sobre energía de los Estados Unidos de 2005 fortaleció considerablemente la viabilidad comercial para las nuevas construcciones. En el pasado, las centrales nucleares nuevas no habían sido una inversión atractiva debido a la abundancia de carbón y gas natural baratos, la ausencia de límites a las emisiones de GEI, y los riesgos de inversión conexos por la falta de experiencia reciente en la concesión de licencias para la construcción de nuevas centrales nucleares. Las disposiciones de la Ley sobre energía, incluidas las garantías de préstamos, la cobertura por el Gobierno de los costos asociados a ciertas demoras posibles en la concesión de licencias y un descuento impositivo por producción de hasta 6 000 MW(e) de potencia nuclear avanzada han mejorado la viabilidad comercial suficientemente como para que empresas y consorcios de la esfera nuclear hagan anuncios de posibles solicitudes de licencias combinadas que se refieren a aproximadamente 25 nuevos reactores en los Estados Unidos de América.

A.6.3. Seguridad¹¹

45. Los indicadores de la seguridad, como los publicados por la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares y reproducidos en las figuras A-2 y A-3, mejoraron notablemente en el decenio de 1990. Sin embargo, en algunos ámbitos las mejoras se han estancado en los últimos años. Asimismo, la diferencia entre las esferas de peor y mejor desempeño sigue siendo considerable, lo que proporciona un amplio margen para seguir realizando mejoras.

46. En el *Examen de la seguridad nuclear* (documento GC(51)/INF/2), que publica anualmente el Organismo, se presenta información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

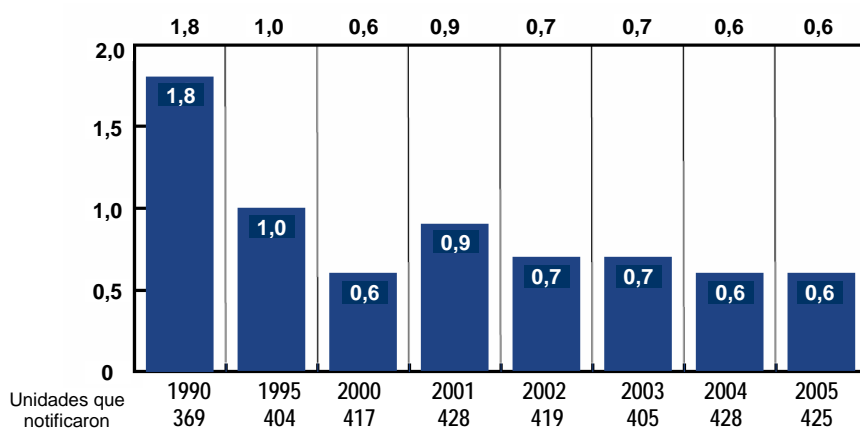


Figura A-2. Paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad.
Fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2005.

¹¹ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006>), y en la dirección <http://www-ns.iaea.org/>.

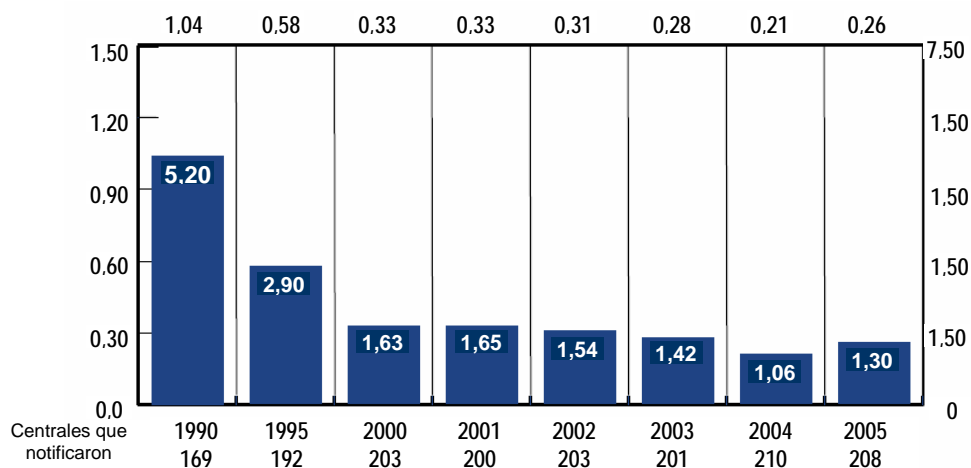


Figura A-3. Accidentes industriales en centrales nucleares por 200 000 horas-persona trabajadas (escala a la izquierda) y por 1 000 000 de horas-persona trabajadas (escala a la derecha). Fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2005.

A.6.4. Resistencia a la proliferación¹²

47. En la Conferencia de Examen del TNP de 2005, el Director General propuso siete medidas encaminadas a fortalecer el régimen de no proliferación: reafirmar el objetivo de eliminar las armas nucleares; fortalecer las facultades de verificación del Organismo; establecer un mejor control de las partes estratégicas del ciclo del combustible nuclear; colocar en lugar seguro y controlar los materiales nucleares (por ejemplo, fortalecer la Convención sobre la protección física de los materiales nucleares y reducir la mínimo el uso del uranio muy enriquecido con fines civiles); demostrar el compromiso con el desarme nuclear; fortalecer el mecanismo relativo al incumplimiento del TNP; y abordar las preocupaciones reales de los Estados en materia de seguridad física. La cuestión de un control más estricto de los elementos estratégicos desde el punto de vista del ciclo del combustible nuclear se debatió en la conferencia titulada “Nuevo marco para la utilización de la energía nuclear en el siglo XXI: garantías de suministro y no proliferación”, sobre la que se presenta un resumen la sección A.3.

B. Fisión avanzada y fusión

B.1. Fisión avanzada¹³

B.1.1. Reactores de agua ligera

48. En Francia y Alemania, AREVA NP ha desarrollado el reactor europeo de agua a presión (EPR) de gran potencia con el fin de satisfacer las necesidades de las centrales eléctricas europeas y aprovechar las economías de escala gracias a una mayor potencia en comparación con la última serie de PWR en Francia (serie N4) y Alemania (serie Konvoi). En Alemania, AREVA NP, junto con asociados internacionales de Finlandia, Francia, los Países Bajos y Suiza, está elaborando el diseño básico del SWR-1000, un BWR avanzado con elementos de seguridad pasiva.

¹² Se puede consultar más información detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la resistencia a la proliferación y las salvaguardias en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) y en la dirección <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>.

¹³ Se puede consultar información adicional en los documentos conexos del *Examen de la tecnología nuclear 2007* en el sitio web IAEA.org. Es posible consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a los reactores de fisión avanzada en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>).

49. En el Japón, las unidades del reactor avanzado de agua en ebullición (ABWR) se benefician de la normalización y la construcción en serie. La explotación comercial de los dos primeros ABWR comenzó en 1996 y 1997, y la de otros dos comenzó en 2005 y 2006. Se están construyendo dos ABWR en Taiwán (China). En 1991 se inició un programa de desarrollo del ABWR-II con el objetivo de reducir considerablemente los costos de generación, en parte mediante aumentos de la potencia y economías de escala. La puesta en servicio del primer ABWR-II está prevista para finales de 2010. También en el Japón se ha finalizado el diseño básico de un PWR avanzado de gran potencia para las unidades Tsuruga-3 y -4 de la Japan Atomic Power Company, y una versión más potente, el APWR+, está en la fase de diseño.

50. En la República de Corea se están aprovechando las ventajas de la normalización y la construcción en serie con la serie de reactores coreanos estándar (KSNP). Se está llevando a cabo la explotación comercial de ocho KSNP. La experiencia acumulada es la base del desarrollo de un KSNP perfeccionado, el reactor de potencia optimizado (OPR), y está previsto comenzar a explotar las primeras unidades a escala comercial en 2010 y 2011. El reactor coreano de la próxima generación, cuyo desarrollo comenzó en 1992, se llama actualmente reactor de potencia avanzado 1400 (APR-1400) y será de mayor tamaño a fin de sacar provecho de las economías de escala. Está previsto que la explotación del primer APR-1400 comience en 2012.

51. En 1997 se certificaron en los Estados Unidos los diseños de un PWR avanzado de gran potencia (el Combustion Engineering System 80+) y un BWR de gran potencia (el ABWR de General Electric). Los diseños AP-600 y AP-1000 de Westinghouse con sistemas de seguridad pasiva fueron certificados en 1999 y 2006 respectivamente. Un grupo internacional dirigido por Westinghouse está elaborando el diseño integral modular del reactor internacional innovador y seguro (IRIS) de 360 MW(e), cuyo núcleo está diseñado para poder funcionar con un ciclo del combustible de cuatro años. El objetivo es obtener la certificación del diseño entre 2008 y 2010. General Electric está diseñando un reactor europeo de agua en ebullición simplificado (ESBWR) de gran potencia que combina las economías de escala con sistemas modulares de seguridad pasiva. Tanto el IRIS como el ESBWR están siendo objeto actualmente de exámenes reglamentarios.

52. En la Federación de Rusia, las versiones evolutivas de las actuales plantas WWER-1000 (V-320) incluyen el diseño de AES-2000 de 1200 MW(e) y el WWER-1000 (V-392). En 2006, el primer WWER-1000 (V-392) fue conectado a la red en Tianwan (China). Se están construyendo unidades adicionales en China, la India y la República Islámica del Irán. Se han planificado dos unidades para el emplazamiento de Novovoronezh, en Rusia, donde también se ha comenzado a elaborar el diseño de un WWER-1500 de mayor potencia. En julio, Rusia y Kazajstán crearon una empresa conjunta para finalizar la elaboración del diseño de un reactor VBER-300 de 200-400 MW(e) para su uso en plantas de cogeneración flotantes o terrestres.

53. La Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) ha finalizado el diseño AC-600 y actualmente está desarrollando el CNP-1000 para la producción de electricidad. La CNNC también está desarrollando el QS-600e/w para la producción de electricidad y la desalación de agua de mar.

B.1.2. Reactores de agua pesada

54. En el Canadá, el diseño del reactor CANDU avanzado (ACR) de la Atomic Energy of Canada Ltd. utiliza combustible de uranio ligeramente enriquecido para reducir el tamaño del núcleo del reactor lo que, a su vez, reduce la cantidad de agua pesada necesaria para moderar el reactor y permite utilizar agua ligera como refrigerante. Asimismo, en el marco del Foro Internacional de la Generación IV (GIF), la Atomic Energy of Canada Ltd. está elaborando un diseño innovador moderado por agua pesada que utilice agua ligera supercrítica como refrigerante. Los reactores de ese tipo incluirían también sistemas pasivos de extracción de calor por circulación natural, en la medida de lo posible, así como sistemas pasivos de extracción de calor del recinto de contención.

55. En 2005 y 2006, la India conectó las dos primeras unidades utilizando su nuevo reactor de agua pesada (HWR) de 540 MW(e) en Tarapur. En ese país también se está diseñando un HWR evolutivo de 700 MW(e) y se está construyendo el reactor avanzado de agua pesada (AHWR), un reactor de tubos de presión verticales refrigerado por agua ligera en ebullición y moderado por agua pesada, que dispone de sistemas de seguridad pasiva y optimizado para utilizar combustible de torio.

B.1.3. Reactores refrigerados por gas

56. En todo el mundo se están explotando actualmente 18 reactores refrigerados por gas (GCR), utilizando dióxido de carbono y dos reactores de ensayo refrigerados por helio. La entidad sudafricana explotadora del reactor modular de lecho de bolas (PBMR), está desarrollando un reactor de ese tipo de 165 MW(e), cuya puesta en servicio está prevista para 2010 aproximadamente. El Gobierno sudafricano ha asignado una financiación inicial para el proyecto y ya se han encargado algunos de los componentes principales. En China, prosiguen los ensayos de seguridad y las mejoras del diseño del reactor de alta temperatura refrigerado por gas (HTR-10) de 10 MW(t), y existen planes para diseñar y construir un prototipo de reactor de potencia (HRT-PM).

57. En el Japón, un reactor experimental de alta temperatura (HTTR) de 30 MW(t) entró en funcionamiento en 1998 y prosiguen los ensayos de seguridad y las actividades de combinación con una unidad de producción de hidrógeno. También se está contemplando la posibilidad de construir un prototipo de reactor de potencia de 300 MW(e).

58. La Federación de Rusia y los Estados Unidos siguen realizando actividades de investigación y desarrollo de un reactor modular de turbina de gas refrigerado por helio (GT-MHR) de 284 MW(e) para la quema de plutonio. Francia cuenta con un activo programa de I+D sobre conceptos de reactores térmicos y reactores rápidos refrigerados por gas, y en los Estados Unidos prosiguen las actividades del Departamento de Energía (DOE) relativas a la cualificación de combustible avanzado para reactores refrigerados por gas. A fin de demostrar aspectos tecnológicos clave de los reactores rápidos refrigerados por gas, se prevé que en 2017 entre en funcionamiento en Francia un reactor experimental de unos 50 MW(t).

B.1.4. Reactores rápidos refrigerados por metal líquido

59. En China se está construyendo el reactor rápido experimental chino de tipo piscina y refrigerado por sodio de 25 MW(e), y está previsto que alcance la criticidad por primera vez para mediados de 2009 y que se proceda a su conexión a la red a mediados de 2010. Las siguientes dos fases de desarrollo estarán relacionadas con un prototipo de reactor rápido de 600 MW(e), cuyas actividades de diseño comenzaron en 2005, y un reactor rápido de demostración de 1000-1500 MW(e).

60. En Francia, el reactor rápido Phénix seguira en funcionamiento durante otros cuatro ciclos de irradiación antes de su parada en 2009. En él se llevarán a cabo ensayos de irradiación en apoyo del programa francés de I+D relativo a la transmutación y de las investigaciones sobre diseños innovadores futuros. En el marco del Foro Internacional de la Generación IV (GIF), Francia tiene previsto poner en servicio un prototipo de reactor rápido refrigerado por sodio de 250-600 MW(e) hacia 2020 a fin de demostrar las mejoras de los aspectos económicos y de las características de seguridad.

61. En la India, el reactor reproductor rápido de ensayo (FBTR) ha estado en funcionamiento desde 1985, y actualmente se está construyendo el prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e) en Kalpakkam. Su puesta en servicio está prevista para septiembre de 2010.

62. En 2005 comenzaron en el Japón los preparativos para las modificaciones necesarias del prototipo de reactor reproductor rápido MONJU de 280 MW(e) antes de volver a ponerlo en funcionamiento. A fin de fabricar combustibles y materiales avanzados, así como tecnología de quemado y transmutación de actínidos menores, el reactor JOYO, un reactor reproductor rápido

experimental, comenzará a irradiar acero ferrítico endurecido por dispersión de óxido, combustible de MOX de uranio-plutonio con el 5% de americio, y MOX con neptunio y americio.

63. En la República de Corea, el Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea ha realizado trabajos de investigación, desarrollo tecnológico y diseño en relación con el concepto de reactor rápido avanzado KALIMER 600 de 600 MW(e). El diseño conceptual se finalizó en 2006. A partir de 2007 el desarrollo de tecnología de reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR) entrará en una nueva fase en el marco del proyecto de colaboración de SFR de la Generación IV.

64. El BN-600 de Rusia, el mayor reactor rápido del mundo, lleva actualmente 26 años en funcionamiento. Se está construyendo el BN-800 de 800 MW(e), cuya puesta en servicio se prevé para 2012. Rusia también está elaborando diversos conceptos de reactores rápidos avanzados refrigerados por sodio y de reactores refrigerados por metal líquido pesado, en particular el concepto de reactor BREST-OD-300 refrigerado por plomo y el SVBR-75/100 refrigerado por la mezcla eutéctica plomo-bismuto.

65. En los Estados Unidos, en el marco de la Alianza Mundial por la Energía Nuclear (GNEP), se están planificando actividades iniciales de I+D en relación con un reactor experimental incinerador avanzado (ABTR) a fin de demostrar la transmutación de actínidos en un espectro rápido, así como tecnologías innovadoras y características de diseño importantes para posteriores plantas de demostración a escala comercial. En el marco del GIF, las actividades estadounidenses se centran en los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR), los reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR), y los reactores rápidos modulares de pequeña potencia refrigerados por sodio (SMRF).

B.1.5. Sistemas accionados por acelerador (SAA)

66. Los aceleradores de partículas combinados con reactores nucleares subcríticos pueden producir menos desechos radiactivos de período largo que otros reactores y transmutar actínidos y algunos productos de fisión de período largo.

67. En China, las actividades de I+D se centran en aspectos físicos y tecnológicos del acelerador de protones de alta energía, la física de reactores de núcleos subcríticos accionados por fuentes externas, los datos nucleares y los estudios sobre materiales. En el Japón, el Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) ha propuesto un núcleo subcrítico rápido refrigerado por la mezcla eutéctica plomo-bismuto con una potencia de 800 MW(t) y se han comenzado a realizar estudios de diseños conceptuales para una instalación experimental de transmutación. En la República de Corea, las actividades de I+D del sistema accionado por acelerador del Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea (KAERI), llamado HYPER (reactor híbrido de extracción de potencia), se encuentra en la tercera fase de un programa de diez años que comenzó en 1997. El programa incluye la finalización del diseño conceptual del núcleo HYPER y la continuación de las investigaciones sobre tecnologías clave.

68. En Europa, los programas nacionales de I+D de Alemania, Bélgica, España, Francia, Italia y Suecia están convergiendo en la demostración de los aspectos básicos del concepto de los SAA. Esos programas incluyen los proyectos integrados EUROTRANS y EUROPART dentro de los programas marco de la Unión Europea. EUROTRANS está elaborando un diseño preliminar y tecnologías de apoyo de un demostrador de SAA europeo. EUROPART está desarrollando las tecnologías del ciclo del combustible destinadas a complementar las tecnologías del sistema EUROTRANS.

69. En Rusia, las actividades recientes de I+D más destacadas relativas a los SAA incluyen el desarrollo y la construcción del conjunto subcrítico de Dubna (SAD) en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares y la confirmación de los conceptos de reactores críticos y subcríticos de sales fundidas con un ciclo cerrado del combustible nuclear en el Centro Científico Ruso del Instituto Kurchatov de Moscú.

B.1.6. El INPRO y el GIF

70. Con la incorporación de Belarús, Eslovaquia, el Japón y Kazajstán, el número de miembros del Proyecto internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del Organismo ascendió a 28 en 2006. El INPRO constituye un foro internacional abierto para estudiar las opciones relacionadas con la energía nuclear y las necesidades conexas. Contribuye a acumular competencia en el desarrollo y la utilización de sistemas de energía nuclear innovadores (SENI) y ayuda a los Estados Miembros a coordinar los proyectos de colaboración conexas. El INPRO ha elaborado una metodología, aplicable tanto a los países en desarrollo como a los desarrollados, para evaluar los SENI desde el punto de vista de los aspectos económicos, la seguridad, el medio ambiente, la gestión de los desechos, la resistencia a la proliferación, la protección física y la infraestructura. Actualmente se están realizando 11 evaluaciones de SENI. Las actividades de la fase 2 comenzaron en 2006. Entre ellas cabe destacar la continuación de la elaboración de la metodología del INPRO y del manual del usuario sobre la base de la información obtenida a partir de las evaluaciones actuales, así como la determinación de opciones institucionales y de infraestructura innovadoras para facilitar el uso de los SENI, con inclusión de los siguientes elementos: examen de los enfoques regionales, armonización de los procesos de concesión de licencias y los requisitos de seguridad, y nuevos métodos de financiación, haciendo hincapié en las necesidades de los países en desarrollo. En la fase 2 también se coordinarán proyectos de colaboración, entre ellos la determinación de necesidades de I+D. En particular, en el marco del INPRO se establecerán los requisitos comunes de los usuarios de SENI, con particular atención a los reactores de pequeña y mediana potencia, y se determinarán, junto con los propietarios y los usuarios de las tecnologías, las medidas necesarias para construir y utilizar esos reactores.

71. El número de miembros del Foro Internacional de la Generación IV (GIF) ascendió a 13 en 2006 con el ingreso de China y Rusia. Mediante un sistema de contratos y acuerdos, el GIF coordina actividades de investigación sobre los seis sistemas de energía nuclear de la próxima generación seleccionados en 2002 y descritos en la publicación *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems*: los reactores rápidos refrigerados por gas, los reactores refrigerados por aleación de plomo líquido, los reactores de sales fundidas, los reactores refrigerados por sodio líquido, los reactores refrigerados por agua supercrítica y los reactores de muy alta temperatura refrigerados por gas. En 2006, los miembros del GIF interesados firmaron cuatro ‘acuerdos de sistema’ que abarcaban la colaboración en relación con los sistemas de reactores rápidos refrigerados por sodio, los sistemas de reactores rápidos refrigerados por gas, los sistemas de reactores de muy alta temperatura refrigerados por gas y los sistemas de reactores refrigerados por agua supercrítica. Los acuerdos constituyen el marco de participación de los países miembros del GIF en actividades de investigación y desarrollo de varias tecnologías.

B.2. Fusión

72. Las investigaciones sobre la fusión nuclear controlada avanzan de forma constante, y su próximo objetivo principal es la combustión autosostenible del plasma. En los últimos años se han realizado progresos importantes respecto de este objetivo mediante el empleo de energía y radiación láser en el método llamado confinamiento inercial, o de campos magnéticos para el confinamiento en lo que popularmente se conoce como sistemas Tokamak, para confinar y fundir los núcleos ligeros, es decir, el deuterio y el tritio. Actualmente se están construyendo nuevas instalaciones de grandes dimensiones, de las cuales la más destacada en la que se utiliza el confinamiento magnético es el Reactor termonuclear experimental internacional (ITER). Los socios en esta excepcional empresa científica internacional destinada a construir la mayor instalación experimental de fusión del mundo representan más de la mitad de la población mundial. Las partes en el ITER firmaron dos acuerdos oficiales el 21 de noviembre de 2006 por los que se comprometían a construir el ITER en Cadarache (Francia): el Acuerdo sobre el Establecimiento de la Organización Internacional de Energía de Fusión del ITER para la ejecución conjunta del proyecto ITER y el Acuerdo sobre Privilegios e Inmidades de la

Organización Internacional de Energía de Fusión para la ejecución conjunta del proyecto ITER. El Director General del OIEA actúa como depositario de ambos acuerdos, que seguirán el proceso de ratificación en la capital de cada país durante el próximo año. El ITER, que significa “el camino” en latín, es una fase importante para uso pacífico de la fusión nuclear y a partir de él se orientarán la mayor parte de las investigaciones sobre fusión por confinamiento magnético de la próxima generación, lo que permitirá acumular conocimientos científicos y tecnológicos para construir una central de fusión llamada “DEMO”.

73. El confinamiento inercial es el principal enfoque alternativo y tendrá el apoyo de varias de las instalaciones más importantes que actualmente se están diseñando o construyendo, a saber, la Instalación nacional de ignición en los Estados Unidos, el Láser megajulio (LMJ) en Francia y el programa del Experimento de ignición rápida en el Japón.



Fig. B-1. Diagnóstico del plasma de fusión (plasma incandescente en el tokamak ASDEX Upgrade (Alemania))

74. Siguen existiendo enormes desafíos tecnológicos en relación con el aprovechamiento de la energía de fusión de complejidad tal – desde el punto de vista científico, técnico y de las necesidades de recursos – que ni un país solo ni un pequeño grupo de países puede mantener el impulso necesario para la investigación durante largos períodos. El OIEA proporciona un foro para ayudar a promover la cooperación internacional, como demostró la Conferencia sobre energía de fusión 2006, celebrada en octubre en Chengdu (China), en la que participaron más de 700 científicos e ingenieros especializados en fusión procedentes de 39 países con el fin de intercambiar sus últimos adelantos y logros.

75. Los estudios experimentales sobre fusión dependen en gran medida de la capacidad para monitorizar y analizar las características del plasma (figura B-1). Una nueva base de datos sobre diagnóstico puesta en marcha por el OIEA constituye un paso importante para garantizar que esos estudios se basen en procedimientos y datos aceptados internacionalmente. Se han medido y/o calculado nuevas secciones eficaces de una serie de procesos de intercambio de carga a fin de estimar la temperatura y presión del plasma.

C. Datos atómicos y nucleares

76. Está aumentando el número de países que solicitan cada vez más bases de datos atómicos y nucleares actualizadas y más exactas, necesarias para garantizar los análisis correctos y creíbles de las aplicaciones nucleares, por ejemplo de la energía de fisión. La aprobación del ITER ha dado lugar a un incremento similar en relación con las actividades de investigación de la fusión.

77. Buena parte del trabajo de elaboración y la creación de buenas bases de datos requieren el estímulo del Organismo. Entre las iniciativas internacionales y nacionales importantes de los últimos años se cuentan la recopilación y publicación de JEFF-3.1 (base de datos conjunta sobre datos evaluados de fisión y fusión) por la AEN de la OCDE en mayo de 2005, y del ENDF/B-VII (Archivo de datos nucleares evaluados) por los Estados Unidos en diciembre de 2006. Ambas bases contienen datos nucleares recomendados que incluyen los adelantos logrados gracias a mediciones directas recientes, proyectos de elaboración de datos del Organismo, y estudios de elaboración de modelos que evidencian el mejor conocimiento de una amplia gama de procesos nucleares. Así pues, como consecuencia de las exhaustivas mediciones realizadas en los Estados Unidos y en Europa, se está mejorando continuamente la calidad de diversas secciones eficaces importantes de las reacciones de neutrones.

78. Algunos de los acontecimientos que tuvieron lugar en 2006 fueron la finalización de una base de datos de alta calidad sobre secciones eficaces de neutrones para su uso directo en estudios sobre el ciclo del combustible torio – uranio, las revaluaciones exhaustivas de las normas sobre secciones eficaces de neutrones, los datos atómicos y moleculares para el diagnóstico de plasma de fusión, y una base de datos sobre secciones eficaces para la producción óptima de radionucleidos terapéuticos en medicina nuclear. Se produjeron importantes datos de covarianza para cuantificar las incertidumbres de las secciones eficaces del torio 232 y del protactinio 231 y 232; esos archivos de datos han sido rápidamente incorporados a las librerías nacionales e internacionales sobre aplicaciones nucleares. Del mismo modo, la comunidad de física nuclear ha adoptado una base de datos sobre normas de secciones eficaces neutrónicas. Estos datos han sido revaluados en relación con un determinado conjunto de reacciones, y constituyen la base y la referencia de todas las mediciones y evaluaciones de datos nucleares posteriores de estos importantes parámetros nucleares.

D. Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación

D.1. Aceleradores

79. La ciencia de los materiales y las investigaciones biomédicas están impulsando los avances en materia de aceleradores, nuevas técnicas analíticas e instrumentación nuclear mejorada. En el marco del régimen de baja energía, se están fabricando y utilizando aparatos compactos y de bajo voltaje para aplicaciones específicas de espectrometría de masas con aceleradores que emplean radiocarbono. Por otro lado, grandes comunidades de usuarios solicitan cada vez más fuentes de luz sincrotrónica. Actualmente se está procediendo a la puesta en servicio de los siguientes sincrotrones: el Diamond en el Reino Unido, el Soleil en Francia y el Australian Synchrotron en Australia. Se encuentran en fase de diseño o construcción el SESAME en Jordania, el Indus-2 en la India y el Candle en Armenia. Existe una amplia demanda de fuentes de haces neutrónicos intensos para su aplicación en investigaciones sobre biomedicina y sobre materiales, así como de estudios sobre daños radioinducidos de materiales que se podrían utilizar en entornos operacionales extremos de reactores de fisión avanzada y de fusión.

D.2. Reactores de investigación

80. Las principales aplicaciones de la mayoría de los reactores de investigación siguen siendo la producción de radioisótopos, las aplicaciones de haces de neutrones, el dopado con silicio y la irradiación de materiales para sistemas de energía nuclear, así como la enseñanza y capacitación para el desarrollo de los recursos humanos. Las características y capacidades de los reactores de investigación, así como su funcionamiento y utilización, son muy diversos. Los cuadros D-1 y D-2 y las figuras D-1 y D-2 se basan en los datos disponibles en la base de datos de reactores de investigación (RRDB) del Organismo.

81. Entre los nuevos reactores de investigación cuya construcción se notificó en el *Examen de la tecnología nuclear 2006*, el reactor australiano de agua ligera de piscina abierta (OPAL) alcanzó la criticidad por primera vez el 12 de agosto de 2006, y su plena potencia de 20 MW el 3 de noviembre de 2006. Está previsto que el reactor de investigación avanzado de China (CARR) entre en funcionamiento en 2007 y que sus actividades principales sean la producción de radioisótopos, el dopado con silicio y las aplicaciones de haces de neutrones. El reactor TRIGA-II en Marruecos se encuentra en la fase de puesta en servicio.

82. El reactor OPAL es un reactor tipo piscina de 20 MW que utiliza combustible de uranio poco enriquecido (UPE) (combustible de siliciuro de uranio) y está refrigerado por agua. Se trata de un reactor de investigación polivalente que se utilizará para la producción de radioisótopos, la prestación de servicios de irradiación y las investigaciones sobre haces de neutrones. Su núcleo compacto está diseñado para alcanzar un alto rendimiento en la producción de neutrones. En el reactor OPAL se ha previsto la construcción de ocho instrumentos de haces de neutrones. La instalación se puede ampliar más y sería posible construir un segundo edificio de guías de neutrones. Un conjunto de instrumentos permitirá realizar estudios a temperaturas, presiones y campos magnéticos distintos.

83. Se prevé que las instalaciones mencionadas se abran a la comunidad de usuarios nacionales e internacionales según un sistema de repartición del tiempo similar a la que se aplica en Grenoble (Francia) y en el FMR-II (Alemania).

84. Habida cuenta del renovado interés en la energía nuclear, y de los adelantos en la energía de fusión, el uso de reactores de investigación para realizar estudios de materiales sigue revistiendo gran interés, y esos reactores desempeñarán una función importante en el desarrollo de materiales para reactores avanzados. Además, gracias a la colaboración regional y la creación de redes, está mejorando la eficacia de la gestión, utilización y repartición de recursos y conocimientos técnicos en relación con los reactores de investigación, especialmente en el caso de las aplicaciones de los haces de neutrones y la producción de radioisótopos para satisfacer las necesidades regionales.

Cuadro D-1. Distribución geográfica de los reactores de investigación según su estado funcional

	En funcionamiento	Parada	Clausurado	En construcción	Planificado	Total
África	9	1	0	1	1	12
América	66	127	73	2	1	269
Asia y el Pacífico	55	18	10	6	1	90
Europa	115	96	87	1	1	300
Total	245	242	170	10	4	671

Cuadro D-2. Distribución geográfica de los reactores de investigación operacionales según su potencia

	$P \leq 100$ kW	$0,1 < P \leq 1$ MW	$1 < P \leq 10$ MW	$P > 10$ MW	Total
África	2	2	2	3	9
América	30	19	13	4	66
Asia y el Pacífico	23	6	15	11	55
Europa	65	11	18	21	115
Total	120	38	48	39	245

85. El objetivo del programa de enriquecimiento reducido para reactores de investigación y ensayo (RERTR) es convertir los reactores de investigación que utilizan combustible de uranio muy enriquecido (UME) en reactores que utilicen combustible de uranio poco enriquecido (UPE). A finales de 2006 se habían convertido 48 reactores de investigación para que utilizaran combustible de UPE, y unos 50 más pueden convertirse con el combustible de UPE disponible. No obstante, en el caso de varios reactores de investigación específicos, se necesitan combustibles de U-Mo de muy alta densidad a fin de convertirlos para que utilicen UPE en lugar de UME, especialmente cuando se trata de determinadas operaciones al límite de la capacidad. La fabricación de esos combustibles también es útil para ampliar las opciones de la parte final del ciclo del combustible en cuanto a la gestión del combustible gastado de los reactores de investigación, ya que con las tecnologías e instalaciones actualmente disponibles su reprocesamiento será menos complejo. A este respecto, es fundamental que la coordinación internacional del desarrollo y la cualificación de combustibles de UPE de alta densidad reciba un apoyo continuo. Los ensayos iniciales de irradiación de combustibles de dispersión de U-Mo de muy alta densidad, que comenzaron a finales de decenio de 1990, establecieron que el comportamiento bajo irradiación de esos combustibles era prometedor. Los experimentos posteriores en distintos países determinaron deficiencias en el comportamiento de los combustibles a potencias y temperaturas elevadas. Los exámenes post-irradiación detallados indican que los problemas del comportamiento del combustible no se derivan del mal rendimiento de las partículas del combustible de U-Mo, sino de la tendencia de la capa de la reacción que se forma entre el combustible y la matriz de aluminio durante la irradiación a hincharse. La demanda de combustibles poco enriquecidos de muy alta densidad hace necesario establecer un programa detallado de fabricación de combustible, caracterización fuera del núcleo, ensayos de irradiación, exámenes post-irradiación y evaluaciones y elaboración de modelos del comportamiento del combustible. Existen varios remedios posibles para corregir los problemas de comportamiento del combustible conocidos, que van de cambios relativamente pequeños en el combustible y la química de la matriz, a la sustitución de la matriz de aluminio por otro material, o la eliminación total de la matriz (combustible monolítico). Todas esas variaciones están siendo investigadas conjuntamente por Alemania, la Argentina, el Canadá, Francia, los Estados Unidos, la República de Corea y Rusia. Recientemente se han notificado resultados post-irradiación de distintos experimentos que indican que al añadir una cantidad de silicio del orden del 2% al 5% a la fase del aluminio de los combustibles de U-Mo dispersos se resuelve el problema de la hinchazón a potencias y temperaturas elevadas. Se están realizando intensas investigaciones con miras a desarrollar un combustible de U-Mo monolítico de muy alta densidad.

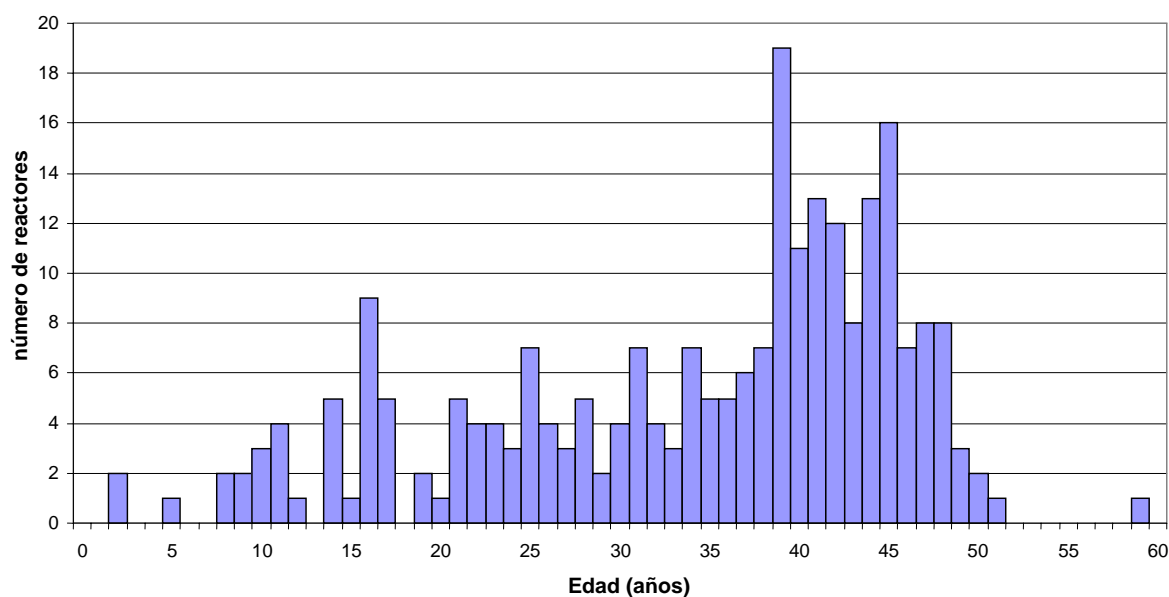


Fig. D-1. Distribución por edad de los reactores de investigación operacionales

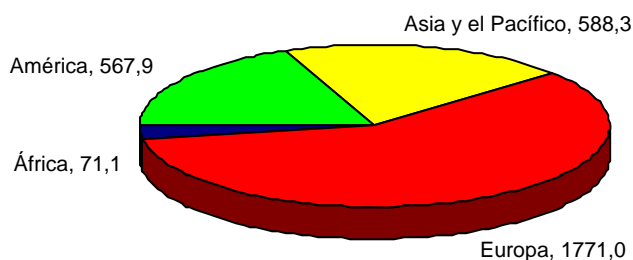


Fig. D-2. Potencia instalada de los reactores de investigación operacionales en MW (Total = 2 938,2 MW)

E. Aplicaciones radioisotópicas y tecnología de irradiación

E.1. Aplicaciones radioisotópicas en la salud¹⁴

86. Los radioisótopos contribuyen considerablemente a mejorar la atención de salud en la mayoría de los países. Se ha registrado un aumento a escala mundial del número de procedimientos médicos relacionados con el uso de isótopos, y con él un aumento proporcionado del número de procedimientos que requieren isótopos distintos, por ejemplo en la medicina nuclear de diagnóstico y las terapias con radionucleidos. Más de 60 reactores de investigación de todo el mundo desempeñan una función primordial en la producción de radioisótopos médicos, y se están construyendo al menos 11 reactores, o se ha previsto su construcción, en varios países. Como se indica en un estudio reciente del Organismo¹⁵, se estima que hay también unos 350 ciclotrones disponibles, muchos de los cuales se dedican a la producción de isótopos para tomografías por emisión de positrones (PET).

87. Recientemente, los aumentos más significativos de las necesidades de isótopos se han registrado en relación con el flúor 18 producido en ciclotrón como fluorodesoxiglucosa (FDG/¹⁸FDG), las aplicaciones de PET para la detección, determinación de la fase y seguimiento del tratamiento de diversos tipos de cáncer, así como la producción de lutecio 177 en reactores con fines de terapia con radionucleidos, por ejemplo, para marcar péptidos para el tratamiento de tumores neuroendocrinos o marcar fosfatos para la paliación de los dolores de huesos. Además, existe una gran demanda de itrio 90 para el tratamiento con radionucleidos y, por consiguiente, está aumentando el interés en el aislamiento y la purificación del radionucleido padre, el estroncio 90, a partir del combustible gastado. Con el incremento del número de unidades de PET en los centros médicos, también está aumentando el interés en radionucleidos emisores de positrones disponibles de generadores isotópicos, especialmente germanio 68/galio 68. La disponibilidad de esos generadores no sólo ayuda a realizar estudios de PET en centros que carecen de ciclotrones, sino que también aumenta la calidad de la información derivada de las imágenes de tumores obtenidas por la PET con productos de galio 68. El interés en los radioisótopos del cobre ha ido en aumento debido a las ventajas de utilizar cobre 64/cobre 62 para la obtención de imágenes por PET y la dosimetría.

¹⁴ Se puede consultar información adicional en los documentos conexos del *Examen de la tecnología nuclear 2007* en el sitio web IAEA.org.

¹⁵ Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States, 2006, OIEA-DCRP/CD.

E.2. Tecnología de irradiación

88. En 2006 se celebraron tres importantes reuniones internacionales, a saber, la Reunión Internacional sobre tratamiento por irradiación (IMPR-2006), el 11° Simposio Tihany sobre radioquímica, y el 7° Simposio Internacional sobre radiación ionizante y polímeros (IRaP-2006), en las que se abordaron aspectos fundamentales y aplicados de la tecnología de irradiación, con especial hincapié en los injertos de polímeros por irradiación. La irradiación facilita considerablemente la realización de injertos, definida como la capacidad de adherir o hacer crecer un material distinto en el soporte de otro.

E.2.1. Injertos de polímeros por irradiación

89. Las tendencias actuales de los estudios de investigación y desarrollo muestran que, hoy en día, los injertos por irradiación en los polímeros se están desarrollando en tres direcciones principales, a saber, en relación con adsorbentes, con membranas y con su uso en medicina y biotecnología. En el caso de los materiales poliméricos, el material “diferente” suele ser un monómero y el “soporte” es un polímero u otro sólido. Se forma un enlace químico entre la mitad injertada y el material. En la figura E-1 se ve un ejemplo procedente del Japón de la evolución de las aplicaciones industriales del tratamiento por irradiación, incluido el injerto de polímeros.

Adsorbentes poliméricos

90. La polimerización por injerto se ha aplicado a escala industrial en la tecnología de producción de adsorbentes de iones metálicos y gases malolientes. Las actividades de investigación y desarrollo sobre la síntesis de adsorbentes de iones metálicos utilizando técnicas de injerto pre-irradiación han dado lugar a adsorbentes que se podrían aplicar a la eliminación de iones tóxicos metálicos como el arsénico, el plomo y el cadmio, y la recuperación de metales como el uranio y el escandio.

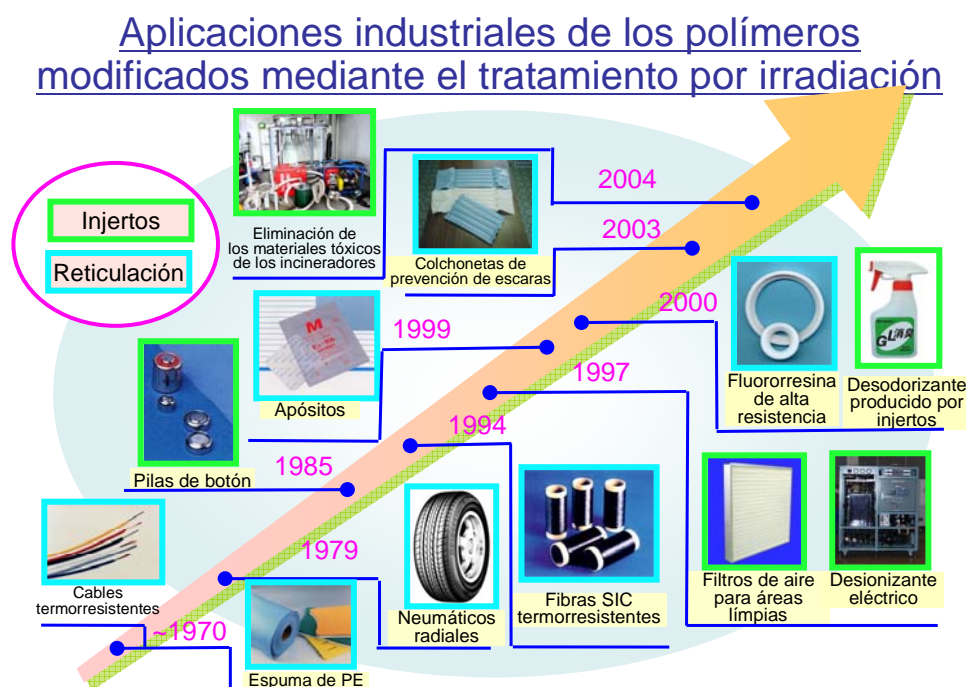


Fig. E-1. Evolución de las aplicaciones industriales del tratamiento por irradiación

Membranas poliméricas

91. Las pilas de combustible son una fuente de energía prometedora para las aplicaciones fijas y portátiles. El rendimiento de esas pilas depende en gran medida de la membrana que se encuentra en su interior, la cual requiere estabilidad en el entorno hostil del hidrógeno y el oxígeno a elevadas temperaturas. La membrana actúa como separador para impedir la mezcla de los gases reactivos y también como electrolito para transportar protones del ánodo al cátodo. Actualmente una de las formas más prometedoras para obtener membranas electrolitos poliméricas conductoras de protones de bajo costo es mediante las técnicas de injerto por irradiación. El método permite utilizar una amplia variedad de películas y monómeros básicos que se pueden adaptar a aplicaciones específicas. Las membranas fabricadas mediante injertos por irradiación son una opción competitiva, ya que para ello se emplean materiales económicos disponibles comercialmente.

Polímeros en medicina y biotecnología

92. La posibilidad de volver a crear diversos tejidos y órganos con tecnología avanzada ha recabado mucho interés en la esfera de la medicina regenerativa. Un método conocido como “ingeniería de tejidos” utiliza superficies de cultivo sensibles a la temperatura, que se crean mediante injertos inducidos por irradiación de polímeros sensibles a la temperatura por irradiación con haces de electrones. El grosor del polímero al que se ha aplicado un injerto y su densidad están reguladas con precisión a escala nanométrica. Estas superficies permiten la recolección no invasiva de células mediante la simple regulación de la temperatura. Los tejidos recogidos se han utilizado para reconstruir varios tejidos, entre ellos superficies oculares, ligamentos periodontales, parches cardíacos, esófagos y otros tejidos.

F. Técnicas nucleares en la agricultura y la alimentación

F.1. Isótopos para localizar contaminantes en los suelos

93. Las técnicas isotópicas y nucleares desempeñan un papel importante en la identificación de fuentes de contaminantes derivadas de diferentes prácticas en el uso de las tierras y de las actividades agrícolas¹⁶. Cuando no se conocen las fuentes específicas de los contaminantes, los encargados de la planificación ambiental, los agricultores o los encargados de formular las políticas tienen dificultades para decidir cuál es la mejor estrategia de ordenación a fin de reducir el impacto de los contaminantes. Por ejemplo, tanto los fertilizantes y el estiércol que se utilizan para acelerar el crecimiento de los cultivos como los plaguicidas empleados en la lucha contra las enfermedades de los cultivos y el ganado pueden convertirse en contaminantes si llegan hasta arroyos, lagos o ríos. En estos medios acuáticos esas sustancias resultan tóxicas para los peces, provocan una proliferación de las malas hierbas en los cursos de agua y pueden afectar a las actividades recreativas, con las consiguientes pérdidas económicas para la industria turística. Tanto los isótopos estables como los radionucleidos procedentes de las precipitaciones radiactivas en los suelos, el agua o las muestras de sedimentos pueden ser de utilidad para determinar con precisión las fuentes de estos contaminantes agrícolas en las cuencas de captación. Los radionucleidos procedentes de precipitaciones radiactivas, como el cesio 137, el plomo 210 y el berilio 7, son residuos radiactivos atmosféricos derivados de actividades humanas, como los ensayos de armas nucleares, y de otras fuentes, principalmente el accidente de Chernóbil, así como de la colisión natural de rayos cósmicos. Estos radionucleidos se adhieren a las partículas de suelo y, por consiguiente, pueden utilizarse como indicadores para seguir el movimiento de estas partículas desde su origen en las cuencas agrícolas hasta los cursos de agua. Además, los fertilizantes, el estiércol, los plaguicidas y los excrementos que depositan los animales al pastar en las

¹⁶ Se puede consultar información adicional en los documentos conexos del *Examen de la tecnología nuclear 2007* en el sitio web IAEA.org.

cuenca agrícolas contienen huellas isotópicas estables y claras (por ejemplo, el carbono 13 y el nitrógeno 15). De manera que determinadas zonas de una cuenca pueden tener claramente diferentes huellas isotópicas estables (biomarcadores naturales) debido a la variedad de las prácticas agrícolas y las distintas modalidades de pastoreo. Estas diferentes huellas isotópicas representan un 'instrumento forense' que la edafología ambiental utiliza para determinar el origen de una variedad de contaminantes, como el nitrato, el fosfato y los plaguicidas, en los cursos de agua.

94. El estudio del suelo mediante huellas isotópicas estables también ayuda a comprender el cambio climático. Los isótopos como el carbono 13 y el nitrógeno 15 se pueden utilizar como indicadores para determinar la forma en que los suelos desempeñan la función de sumideros de los gases de efecto invernadero. Se considera que los cambios en los isótopos del carbono y del nitrógeno en los suelos corresponden a la modificación de la materia orgánica de los suelos debida a las variaciones en los niveles de concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y a actividades relacionadas con el uso de las tierras.

F.2. Mejora de los cultivos

95. La inducción de mutaciones desempeña un papel fundamental en el desarrollo de variedades de cultivos nuevas y mejoradas. En el último decenio la investigación sobre inducción de mutaciones para mejorar los cultivos se ha intensificado y ampliado con objeto de determinar y comprender la función de genes específicos.

96. La tecnología se utiliza para desarrollar variedades de cultivos de mejor calidad nutricional, lo cual abarca también la reducción de agentes antinutricionales. Los cambios genéticos provocados por las mutaciones inducidas alteran la expresión de los genes que afectan a las diferentes vías bioquímicas. Por ejemplo, el oxalato de calcio (un compuesto que forma cristales aciculares y que se encuentra en algunas variedades de plantas venenosas) no es un nutriente ni una fuente beneficiosa de calcio y en grandes dosis puede resultar tóxico. Este compuesto se encuentra en muchas verduras nutritivas, como las espinacas, las acelgas y otros vegetales comestibles. Reduciendo a un mínimo la presencia de oxalato mediante la inducción de mutaciones es posible obtener hortalizas más nutritivas y digeribles.

97. Se está investigando el efecto mutágeno de los rayos cósmicos y su función en las mutaciones naturales y en la evolución. A partir de los primeros experimentos internacionales de la misión Apolo 16, en el decenio de 1970, en que se estudiaron los efectos de los rayos cósmicos en diferentes organismos, se puso en marcha en la Academia China de Ciencias Agrícolas un programa de fitotecnia espacial que ha permitido obtener una gama de nuevos mutantes de cultivos, con inclusión de variedades de arroz de muy alto rendimiento, resistentes a micosis como el añublo del arroz, y de hortalizas como tomates y pimientos de gran tamaño.

98. La elaboración de mapas híbridos de radiación es una técnica que consiste en exponer células somáticas a dosis letales de rayos gamma o rayos X para fragmentar los cromosomas. Posteriormente, éstos se recuperan introduciéndolos en microcélulas que después se fusionan con células receptoras idóneas. Esta técnica que se desarrolló para facilitar la secuenciación del genoma humano y que permite elaborar mapas de genomas completos, se está aplicando actualmente a sistemas vegetales. Se han elaborado mapas híbridos de radiación para diversos cultivos, como la cebada, el maíz, el trigo y el algodón, a fin de analizar en detalle y secuenciar los correspondientes genomas, lo cual facilitará la determinación y transferencia de genes que afectan a rasgos útiles desde el punto de vista agronómico relacionados con la calidad y la resistencia al estrés, con objeto de mejorar los cultivos.

F.3. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias

99. Las tecnologías moleculares y relacionadas con la energía nuclear han desempeñado y siguen desempeñando un papel importante en el mejoramiento del ganado y los productos pecuarios. Sus aplicaciones abarcan tanto la identificación y manipulación como la caracterización y el rastreo de proteínas, de DNA y de RNA. Diversos adelantos en las tecnologías de detección, como la obtención de imágenes con fósforo, la utilización de la microfluidica para pasar directamente de la muestra a los resultados y el uso de nanotecnologías, ofrecen posibilidades de introducir y utilizar dispositivos más sensibles, rápidos y sólidos tanto en el laboratorio como sobre el terreno.

100. Tiende a aumentar el uso de los isótopos estables en aplicaciones relacionadas con la producción pecuaria y la salud animal. El marcado de forrajes con carbono 13 o nitrógeno 15 o la introducción directa de compuestos marcados con esos isótopos en el rumen (primer estómago de los rumiantes) permiten obtener conocimientos importantes sobre el metabolismo de los carbohidratos y la absorción de proteínas y nutrientes. También podría utilizarse el estiércol de los rumiantes para elaborar mapas que indiquen el destino final del carbono y el nitrógeno en el suelo y en las plantas. Esa información es útil tanto para elaborar estrategias de utilización óptima del forraje como para aumentar la eficacia y sostenibilidad del sistema productivo general. La comparación de las huellas isotópicas estables en los fluidos corporales de los animales o en los productos pecuarios con las que se encuentran en los posibles forrajes permite registrar la selección de la alimentación, así como sus cambios, y puede utilizarse para diferenciar la ingestión de pastos tropicales y de otro tipo de forraje. La misma clase de información también puede utilizarse para determinar el origen de los productos pecuarios con procedimientos no invasivos. Este método puede ser útil para determinar las posibles funciones de la fauna silvestre como portadora de enfermedades animales; a este respecto cabe mencionar la contribución de las aves migratorias a la propagación de la gripe aviar desde las zonas endémicas hacia zonas no infectadas. Cada vez se utiliza más una técnica de dilución de agua (óxido de deuterio) marcada con isótopos estables para determinar la masa corporal magra, el contenido de lípidos, la composición corporal, la masa de agua total y la ingestión de leche en los terneros. La concentración de óxido de deuterio en los fluidos corporales se solía medir por espectrometría de masas de relación isotópica, pero en estudios recientes se ha demostrado que también puede utilizarse una técnica relativamente barata y de igual precisión: la espectroscopía infrarroja.

F.4. Aplicación de la técnica de los insectos estériles para luchar contra las plagas de insectos

101. En todos los programas zonales de lucha contra plagas de insectos en cuyos marcos se sueltan insectos estériles se utilizan actualmente irradiadores de radioisótopos para esterilización; se trata de una tecnología de eficacia comprobada y fiable. Sin embargo, están surgiendo dificultades tanto para la recarga de las actuales fuentes de radiación como para la adquisición y el envío internacional de nuevas fuentes, y al menos uno de los principales productores ha decidido retirarse definitivamente del mercado. Se está desarrollando una tecnología alternativa basada en la irradiación con rayos X y en Panamá se establecerá un nuevo servicio dedicado exclusivamente a la esterilización del gusano barrenador del ganado mediante esa tecnología. Es probable que en el futuro se incremente considerablemente el desarrollo y la utilización de aparatos de rayos X para su aplicación en la técnica de los insectos estériles (TIE) y en programas conexos.

F.4.1. Aplicación de la TIE para luchar contra la mosca de la fruta.

102. Se ha seguido difundiendo el uso de la TIE como componente de programas zonales de manejo integrado de plagas para luchar contra las principales plagas agrícolas y en 2006 empezaron a operar varios servicios nuevos. En septiembre de ese año se inauguró en Juazeiro, estado de Bahia (Brasil) un servicio de cría en gran escala de mosca mediterránea de la fruta, que en una primera etapa producirá unos 100 millones de machos estériles por semana. Para establecer este servicio se contó, entre otra asistencia, con el apoyo del programa de cooperación técnica del Organismo; las actividades de este servicio beneficiarán a las zonas productoras de frutas comerciales (mango, uva, etc.) de varios distritos de regadío en rápida expansión situados cerca del río San Francisco en la región árida del nordeste del país. En el futuro se prevé abarcar también la producción de cierta cantidad de mosca de la fruta *Anastrepha* spp., así como la cría en gran escala de parasitoides de la mosca de la fruta. Este proyecto puede reducir considerablemente la aplicación de insecticidas al suprimir la mosca de la fruta por un medio inocuo para el medio ambiente. El objetivo final consiste en eliminar los costosos tratamientos poscosecha creando zonas de baja prevalencia y zonas libres de la mosca de la fruta reconocidas por los interlocutores comerciales.

103. En España, en la región de Valencia, la principal productora de cítricos, se ha establecido otro servicio de cría y esterilización de la mosca mediterránea de la fruta que producirá 400 millones de machos estériles por semana. Se prestó apoyo técnico en el marco de un memorando de entendimiento entre el Programa conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura y la Consejería de Agricultura, Pesca y Alimentación de la Generalitat de Valencia.

104. En la Argentina, la región de la Patagonia es la primera zona del país que el Servicio de Inspección Sanitaria Animal y Vegetal (APHIS) de los Estados Unidos de América ha reconocido oficialmente como zona libre de la mosca de la fruta. Este importante logro es el resultado de diez años de esfuerzos conjuntos de los gobiernos, a nivel federal y provincial, y de la industria frutícola. El apoyo técnico de diversas organizaciones nacionales e internacionales, entre ellas el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la FAO y el Organismo, contribuyó al éxito de esta iniciativa. Gracias a este logro, la Patagonia podrá exportar frutas y hortalizas frescas a los Estados Unidos de América sin tratamientos de cuarentena, lo que según el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de la Argentina (SENASA) representará un ahorro anual de dos millones de dólares. Después de estos éxitos, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos ha anunciado que financiará la puesta en marcha de un nuevo programa de lucha contra la mosca de la fruta, también basado en la TIE, en una zona de 56 000 hectáreas que abarca las importantes provincias productoras de cítricos de Entre Ríos y Corrientes, en la parte nororiental de la Argentina.



Zonas de producción de manzanas y peras en la Patagonia (Argentina).

F.4.2. Utilización de la TIE para luchar contra el gusano barrenador del ganado

105. En julio de 2006 se inauguró en Panamá un nuevo servicio con capacidad para criar unos 100 millones de moscas del gusano barrenador del Nuevo Mundo. Durante los últimos 30 años los logros del programa de erradicación se debieron al servicio de cría en gran escala de la Comisión México Americana para la Erradicación del Gusano Barrenador del Ganado, con sede en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (México), que proporcionó moscas estériles para todas las campañas de erradicación realizadas en México, América Central y el Caribe. En los últimos años parte de su producción, muy reducida, se ha destinado al mantenimiento de la barrera de moscas estériles en la región oriental de Panamá y al actual programa de erradicación en Jamaica.

F.4.3. Utilización de la TIE para luchar contra los mosquitos

106. Existe interés en utilizar la TIE no sólo para luchar contra el mosquito *Anopheles*, vector de la malaria, sino también contra otros que transmiten importantes enfermedades virales, como el dengue y la chikungunya. En Rímimi (Italia) se ha puesto en marcha un proyecto piloto de utilización de la TIE para luchar contra el mosquito *Aedes albopictus*, vector del dengue. Se han elaborado métodos que permiten producir grandes cantidades de pupas masculinas para su esterilización y suelta. Tras efectuar sueltas considerables de machos estériles en una zona de Rímimi se han podido medir los efectos en la densidad de población del vector. La misma especie de mosquito también ha provocado recientemente una epidemia importante de fiebre chikungunya en algunas islas del Océano Índico, en particular en la Reunión.

F.5. Calidad e inocuidad de los alimentos

F.5.1. Vigilancia de la inocuidad de los alimentos: medición de los residuos de plaguicidas

107. Para poder aplicar programas de vigilancia de la inocuidad de los alimentos es fundamental contar con métodos analíticos validados. Es preciso potenciar el funcionamiento y la aplicabilidad de esos métodos en laboratorios de países en desarrollo. Además, según se prescribe en los protocolos de laboratorio pertinentes sobre garantía de calidad, la notificación de los resultados debe ir acompañada de una estimación de los márgenes de incertidumbre. La Dependencia de Productos Agroquímicos de los laboratorios del Organismo, establecidos en Seibersdorf, ha prestado asistencia en la elaboración de esos protocolos para el uso de compuestos radiomarcados a fin de optimizar tanto la preparación,

extracción y limpieza de muestras como las etapas analíticas durante el desarrollo de métodos cromatográficos que deben emplearse en programas reglamentarios para el análisis de residuos de plaguicidas y otros contaminantes en muestras alimentarias y ambientales. Los protocolos también son útiles para calcular los márgenes de incertidumbre de los métodos de medición.

G. Salud humana

G.1. Adelantos en cardiología nuclear

108. Gracias a la aplicación de estrategias innovadoras en materia de técnicas nucleares, el campo de la cardiología nuclear, que antes se centraba en la determinación del flujo sanguíneo coronario hacia el miocardio y su capacidad de bombear sangre a las arterias principales, se ha ampliado hasta abarcar la obtención de imágenes moleculares. Al combinar la información que proporciona la tomografía por emisión de positrones (PET) con la obtenida mediante la moderna tomografía computarizada (TC), los sistemas híbridos PET-TC permiten hacer un diagnóstico precoz de las cardiopatías coronarias. Esta tecnología resulta particularmente útil en el caso de pacientes diabéticos, hipertensos o con elevados niveles de lípidos en sangre. Esta compleja información estructural y molecular a nivel celular permite evaluar en cada caso el riesgo de futuros episodios miocárdicos graves y posiblemente letales. Sobre la base de estas evaluaciones se pueden aconsejar cambios en el modo de vida, o decidir intervenciones médicas anticipadas, a fin de retrasar el desarrollo de la enfermedad cardiovascular y reducir los factores de riesgo asociados.

109. Desde el punto de vista clínico, la elección del método de diagnóstico más apropiado en las diferentes etapas de las enfermedades cardiovasculares dependerá de las características del entorno clínico y de la información concreta que se desee obtener. Puesto que cada vez se hace más hincapié en la prevención, a la vez que se acentúa el envejecimiento de la población en los Estados Miembros, tanto desarrollados como en desarrollo, la obtención de imágenes del corazón por medios no invasivos seguirá cobrando importancia e influyendo en el tratamiento de pacientes con enfermedades cardiovasculares en todo el mundo.

G.2. Últimos adelantos en radioterapia

110. La identificación y delimitación de tumores mediante los sistemas PET-TC y las imágenes por resonancia magnética (IRM) permiten planificar los tratamientos de radioterapia para tener en cuenta tanto los rasgos anatómicos que indica la TC como las imágenes moleculares obtenidas con las tecnologías PET e IRM.

111. Cada vez es más frecuente el uso de las nuevas tecnologías en el tratamiento radioterapéutico. La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) abarca la utilización de técnicas virtuales o de simulación de TC y la planificación del tratamiento en 3 dimensiones. Se trata de configurar la distribución de la dosis producida por los haces de radiación centrando los haces en tres dimensiones para adaptarse mejor al volumen del tumor. La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) deriva de la radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT). En primer lugar el plan de distribución de la dosis es definido por el médico, al igual que en la radioterapia tradicional, pero después intervienen algoritmos informáticos muy complejos que determinan la configuración óptima de orientaciones e intensidades dentro de cada haz para conseguir la distribución de dosis por volumen prescrita. Esto se realiza mediante un acelerador lineal equipado con un colimador multiláminas (MLC). Una máquina llamada Cyber-Knife utiliza movimientos dirigidos mediante un dispositivo robótico para mejorar la precisión de los haces de radiación muy concentrados. La IMRT puede utilizarse para producir distribuciones de dosis con un nivel de conformidad muy superior al que proporciona la técnica 3D-CRT. Esto significa que es posible reducir considerablemente el volumen de tejido normal expuesto a dosis elevadas. Sin embargo, pese a que la adecuación de las distribuciones de dosis con alto nivel de precisión ha mitigado considerablemente los efectos adversos de la radioterapia (morbilidad), aún está por verse si esta tecnología permite curar más pacientes con cáncer o prolongar más su vida que otras tecnologías más sencillas.

112. También se están registrando rápidos avances en los métodos para resolver el problema del movimiento de los tumores y los órganos corporales. Tanto durante las sesiones de radioterapia como entre una y otra sesión las partes del cuerpo se mueven debido a la respiración, la digestión y a pequeñas diferencias en la colocación del paciente para cada tratamiento. Este movimiento puede provocar la aplicación de dosis excesivas a los tejidos normales que rodean el tumor, así como un tratamiento inadecuado del propio tumor. La radioterapia guiada por imágenes (IGRT) se basa en la obtención de imágenes del paciente colocado en la camilla para recibir el tratamiento, tanto inmediatamente antes de éste como durante las sesiones terapéuticas. Se emplea para identificar cambios en la posición del tumor y de los órganos y seguir su movimiento con objeto de modificar la radioterapia adecuándola a la nueva posición. Combinando esta técnica con un sistema de "activación" con la respiración, que enciende y apaga el haz de radiación en sincronía con el movimiento respiratorio, es posible limitar el tratamiento a la fase del ciclo respiratorio en que el tumor está enfocado por el haz, lo cual aumenta la dosis irradiada al tumor y reduce la que reciben los tejidos circundantes. En un equipo de radioterapia combinada con tomografía (véase la figura G-1), un acelerador lineal reemplaza al tubo de rayos X: el tratamiento se administra mientras el acelerador gira alrededor del paciente y la dosis de radiación se modula mediante un colimador multiláminas binario. Un detector registra la radiación del acelerador lineal que pasa a través del paciente y mientras se administra el tratamiento se forman imágenes de muy alta calidad. Debido al grado de precisión conseguido, se ha denominado a este procedimiento y a la IGRT en general "radioterapia adaptativa" (ART).

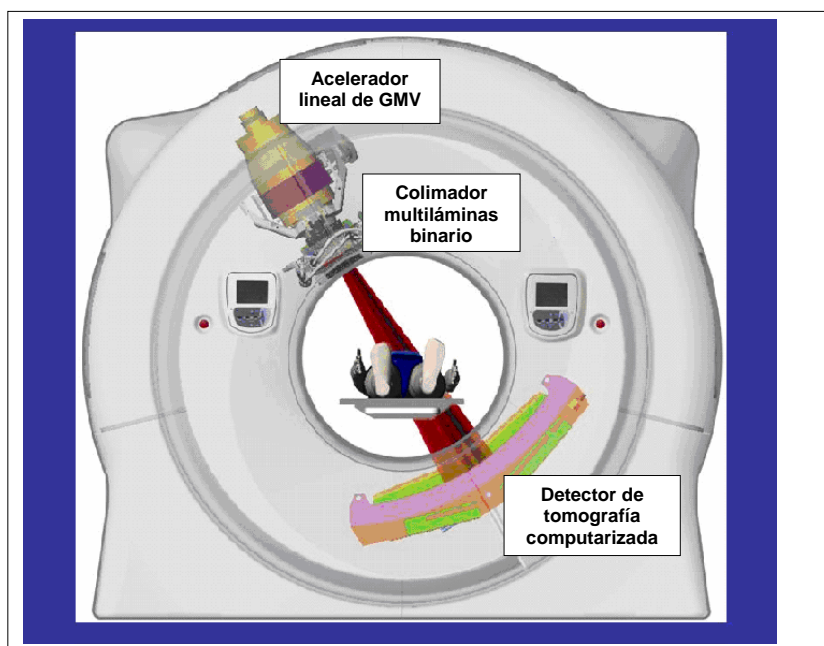


Fig. G-1. Radioterapia combinada con tomografía

G.3. Nutrición

113. La necesidad urgente de iniciativas nutricionales eficaces salta a la vista cuando se considera la situación actual en el mundo: por una parte, hay 170 millones de niños que no alcanzan el peso normal y la desnutrición es un factor importante en más de la mitad de los casos de muerte infantil en todo el mundo; por otra parte, hay más de mil millones de adultos con sobrepeso. Es lo que se ha dado en llamar "la doble carga de la malnutrición". Constituye una carga muy importante para los sistemas de salud de los países en los que cada vez será más necesario tratar enfermedades provocadas por la alimentación, como son las enfermedades cardiovasculares y la diabetes, cuando todavía prevalecen la desnutrición y las enfermedades transmisibles.

114. El recurso a las técnicas nucleares, en particular las técnicas de isótopos estables, puede ser útil para determinar y evaluar las iniciativas nutricionales. En particular, las actividades del Organismo en el campo de la nutrición humana se centran en la importancia de prevenir y tratar la malnutrición durante la “ventana de oportunidad”, es decir, durante el embarazo y los dos primeros años de vida.

115. La mayor aplicación de estas técnicas en los programas de nutrición de países en desarrollo es un ejemplo de la evolución reciente en la nutrición aplicada. La mayor posibilidad de acceso a los equipos de análisis, por ejemplo los espectrómetros de masas para la determinación de relaciones isotópicas (IRMS) en el marco de proyectos de nutrición, contribuirá significativamente a incrementar la utilización de las técnicas de isótopos estables en un futuro cercano. Es especialmente interesante la reciente aparición de equipos menos costosos, como el espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para el análisis del deuterio (un isótopo estable de hidrógeno) a fin de evaluar la composición corporal y medir la ingesta de leche materna en los lactantes.

H. El agua y el medio ambiente

H.1. Datos isotópicos para la gestión de los recursos hídricos

116. Las condiciones climáticas determinan en buena parte la existencia y la distribución de los recursos hídricos, tanto en masas de agua de superficie como en acuíferos. Se ha admitido que la mejor comprensión del ciclo hidrológico y de los posibles efectos del cambio climático es un factor decisivo de las iniciativas de gestión sostenibles de los recursos hídricos. El contenido de isótopos en las precipitaciones, los ríos y las aguas subterráneas, en particular los isótopos estables del oxígeno e hidrógeno y el tritio, ayuda a entender la correlación entre el ciclo hidrológico y el clima. Por tanto, los datos isotópicos son sumamente útiles para comprender los efectos de la variabilidad del clima sobre los recursos hídricos. Uno de los medios más utilizados en las actuales investigaciones a nivel mundial sobre las tasas de acumulación y desaparición del hielo es el análisis isotópico de muestras de hielo y su relación con los isótopos presentes actualmente en las precipitaciones. Hay otros aspectos de las aplicaciones isotópicas para la gestión de los recursos hídricos que también dependen de la composición isotópica actual de las precipitaciones.

117. Reconociendo esta importante aplicación de los datos isotópicos, varios países están tomando medidas para extender la disponibilidad de estos datos a escala nacional. En 2006 se puso en marcha un proyecto en la India orientado a la recopilación e interpretación de datos sobre la composición isotópica de las precipitaciones, los ríos y las aguas subterráneas. Tailandia también tomó iniciativas similares para crear una base de datos nacional.

118. Estas iniciativas nacionales contribuirán a fortalecer más la Red Mundial sobre Isótopos en las Precipitaciones (GNIP), que el OIEA gestiona desde 1961. La figura H-1 representa la distribución de isótopos del oxígeno en las precipitaciones, medidos durante el mes de enero en el hemisferio norte, que normalmente es frío, y pone de manifiesto la marcada correlación entre la temperatura y los isótopos (la relación isotópica es inferior en las zonas más frías). Con los datos sobre isótopos de la GNIP los países pueden interpretar y utilizar de una forma significativa sus datos nacionales o locales sobre isótopos. Los datos de la GNIP no sólo ayudan a entender los efectos del clima sobre el ciclo hidrológico, también son determinantes para aplicaciones tan diversas como la evaluación y la gestión de los recursos de aguas subterráneas, la identificación de fuentes de contaminación y la autenticación del origen de frutas y verduras.

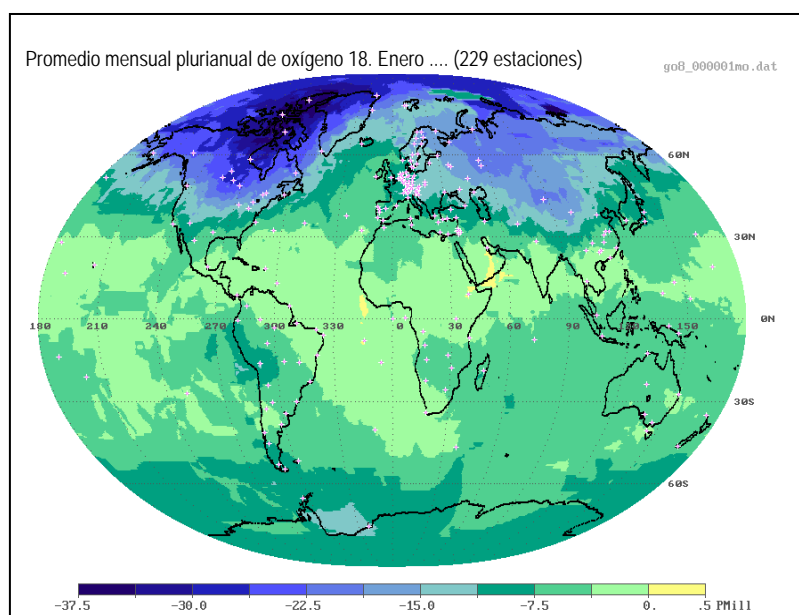


Fig. H-1. Correlación entre los isótopos y la temperatura: isótopos del oxígeno en enero.

H.2. El medio ambiente marino y terrestre

H.2.1. Microanálisis de partículas radiactivas en los sedimentos marinos

119. Una gran parte de los radionucleidos naturales y artificiales que se incorporan en el medio marino están asociados a partículas de origen biológico, mineral o nuclear. Se sabe, por ejemplo, que los radioisótopos naturales del polonio, el torio y el plomo en los océanos son captados por partículas marinas en proceso de sedimentación hacia las profundidades oceánicas¹⁷. Algunos de los radionucleidos antropogénicos que se encuentran en los sedimentos marinos forman parte de “partículas calientes” microscópicas. Como estas partículas son fuentes puntuales de posible significación radiológica si son ingeridas por organismos marinos o personas, es necesario hacer una evaluación a largo plazo de las partículas calientes de los océanos, sus propiedades y su comportamiento biogeoquímico. Se dispone de distintas técnicas de microimágenes y analíticas, como la microscopía electrónica de barrido, las técnicas de microrradiografía por sincrotrones y las técnicas de microespectrometría de masas, por ejemplo la espectrometría de masas de emisión de iones secundarios (SIMS) o la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

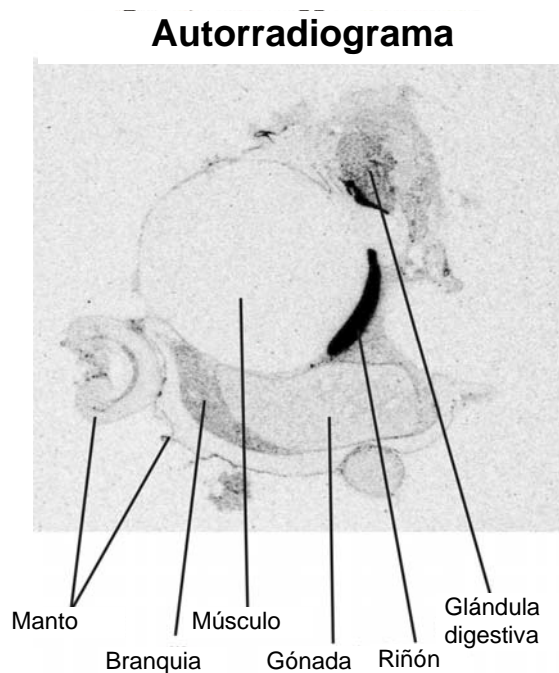
H.2.2. Utilización de radiotrazadores para garantizar la inocuidad de los alimentos marinos

120. La acuicultura marina de moluscos bivalvos (por ejemplo, mejillones, ostras y vieiras) es una actividad económica en expansión en todo el mundo, pero sobre ella pesa el riesgo constante de la tendencia de esos organismos a bioacumular metales tóxicos hasta niveles superiores a los de su inocuidad y a los fijados en las directrices de exportación.

121. La evaluación mediante técnicas de radiotrazadores es una solución rentable en relación con las estrategias de gestión para atenuar estos riesgos. Los radiotrazadores permiten hacer un seguimiento sensible de la acumulación, localización y eliminación de metales tóxicos en estos organismos (bivalvos, peces, camarones) y en toda la cadena alimentaria marina. Por ejemplo, está demostrado

¹⁷ Se puede consultar información adicional en los documentos conexos del *Examen de la tecnología nuclear 2007* en el sitio web IAEA.org.

que las vieiras bioconcentran en los tejidos grandes cantidades de cadmio, un metal tóxico, hasta niveles que muchas veces superan los establecidos en las normas recomendadas internacionalmente. Los estudios de autorradiografía realizados con cadmio 109 utilizado como radiotrazador han demostrado que el cadmio se concentra casi exclusivamente en el riñón y la glándula digestiva (véase la figura H-2), órganos que los consumidores generalmente no comen y que, por lo tanto, se pueden retirar antes de entrar en la cadena alimentaria. Así, estos estudios con radiotrazadores permiten a la industria marisquera tomar medidas prácticas para mejorar la calidad de los alimentos marinos en los mercados internacionales.



*Fig.H-2. Las zonas negras indican las concentraciones del radiotrazador cadmio-109 en una vieira.
(Fuente: C Rouleau IML Canada)*

H.3. Vigilancia de la contaminación atmosférica

122. La contaminación atmosférica causada por partículas en suspensión constituye una amenaza para la salud humana, especialmente en las grandes ciudades. Las partículas contaminantes finas pueden penetrar hasta los tejidos profundos de los pulmones, donde pueden permanecer mucho tiempo. Para que un sistema de gestión de la calidad del aire sea eficaz es necesario saber cuáles son las fuentes de partículas contaminantes. Las técnicas analíticas nucleares (fluorescencia por rayos X, análisis de activación de neutrones y técnicas que utilizan haces de iones) permiten determinar la composición elemental de las partículas del aire. Si se conoce la composición, se puede identificar la fuente específica o calcular las contribuciones relativas de los distintos tipos de fuentes contaminantes, por ejemplo la contaminación de vehículos, de las industrias o de fuentes transfronterizas. Con esta información se podrán decidir las medidas apropiadas para reducir las emisiones, por ejemplo reducir o prohibir el consumo de gasolina con plomo o mejorar la infraestructura de transporte urbano. Son de señalar los resultados especialmente satisfactorios de este tipo de medidas en el sudeste de Asia. Las técnicas analíticas nucleares pueden utilizarse igualmente para medir la eficacia de las medidas contra la contaminación.



Fig.H-3: Analizador de aire de gran volumen para vigilar la contaminación atmosférica o la presencia de radón.

H.4. El radón en la atmósfera

123. El radón es un gas radiactivo natural que pasa continuamente de la superficie de la Tierra a la atmósfera. El período de semidesintegración del radón 222 (3,82 días) es similar a la permanencia de muchos contaminantes atmosféricos como el anhídrido sulfuroso, los óxidos nitrosos y el ozono. Por eso es cada vez más frecuente hacer mediciones de radón en los estudios de procesos atmosféricos, en particular para las pruebas de circulación atmosférica y los modelos de transporte.

124. Las concentraciones de radón varían según la dirección del viento, especialmente cerca de la costa porque el flujo de radón del océano hacia la atmósfera es muy inferior al que proviene del suelo. Por tanto, el radón se puede utilizar como indicador del grado de contacto entre la masa de aire y la tierra. La introducción de mediciones de radón en el programa de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es un ejemplo de esta aplicación. La VAG tiene por objeto hacer observaciones fiables de la composición química y de determinadas características físicas de la atmósfera a escala mundial y regional, dar a la comunidad científica medios para prever las condiciones atmosféricas futuras y organizar evaluaciones para contribuir a la formulación de una política del medio ambiente. Para satisfacer estas necesidades de estudios atmosféricos se están introduciendo mejoras en los sistemas de detección del radón en diversas esferas.

H.5. Los materiales de referencia y la calidad analítica

125. La vigilancia ambiental requiere mediciones cada vez más precisas y resultados reproducibles para crear confianza en relación con la seguridad alimentaria y el comercio internacional, entre otras cosas. Los laboratorios de todo el mundo están mejorando el suministro de medios para garantizar la comparabilidad y la calidad de los resultados de las mediciones, con dos tipos de iniciativas principalmente. El primero es establecer una infraestructura apropiada para las mediciones, lo que guarda relación principalmente con institutos de metrología nacionales y la determinación de las normas de calibración necesarias. El segundo es la disponibilidad de instrumentos de garantía y control de calidad, incluidos los materiales de referencia. Se trata de materiales similares a los tipos de muestras comunes, que contienen cantidades conocidas de las sustancias que se analizan habitualmente. Como en la vigilancia y los estudios ambientales se tienen en cuenta muchos tipos de materiales y sustancias analizadas, hay una fuerte demanda de materiales de referencia apropiados en los laboratorios.

126. Existe una vinculación estrecha entre la tecnología nuclear y los materiales de referencia desde dos puntos de vista. Por una parte, se considera que las técnicas analíticas nucleares y otras conexas (por ejemplo, la activación de neutrones) son técnicas de referencia para la caracterización de nuevos materiales de referencia, Por otra parte, para comprobar la calidad de los resultados de mediciones

realizadas con técnicas analíticas nucleares se utilizan sistemáticamente materiales de referencia. Hay una necesidad creciente de materiales de referencia de alta calidad y correctamente determinados por procedimientos metroológicos, caracterizados para radionucleidos, isótopos estables, oligoelementos, contaminantes orgánicos y otros (véase la figura H-4). A fin de garantizar la confianza debida en los resultados de las mediciones, la Organización Internacional de Normalización (ISO), la Cooperación para la Trazabilidad Internacional en Química Analítica (CITAC) y otros órganos internacionales están prestando más atención a la producción de materiales de referencia.

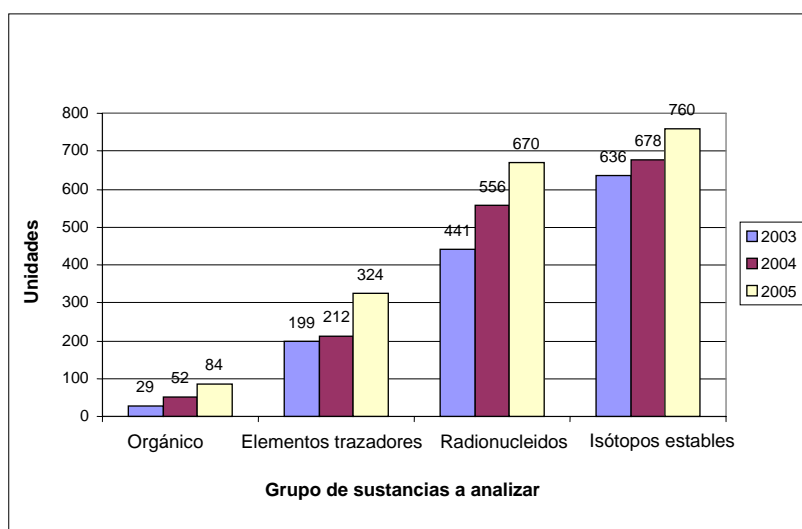


Fig.H-4. Unidades de materiales de referencia del OIEA distribuidas en 2003, 2004 y 2005.