

Conferencia General

GC(59)/INF/2

8 de julio de 2015

Distribución general

Español

Original: inglés

Quincuagésima novena reunión ordinaria

Punto 17 del orden del día provisional
(GC(59)/1)

Examen de la Tecnología Nuclear de 2015

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio Examen de la Tecnología Nuclear. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en el que se destacan las novedades importantes ocurridas en 2014.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2015* trata sobre los siguientes temas: las aplicaciones eléctricas, los datos atómicos y nucleares, las aplicaciones de aceleradores y reactores nucleares, las técnicas nucleares para mejorar la sanidad animal, la dosimetría de la radiación médica, los radiofármacos, los isótopos en los estudios del clima y la hidrología, y la investigación de los cambios en el medio ambiente marino mediante técnicas nucleares.
- La versión final se elaborará teniendo en cuenta las deliberaciones de la Junta de Gobernadores y se hará llegar a los Estados Miembros como documento informativo en la quincuagésima novena reunión ordinaria de la Conferencia General.
- En el *Informe Anual de 2014* del OIEA (GC(59)/7), en particular en la sección relativa a la tecnología, y en el *Informe de Cooperación Técnica para 2014* (GC(59)/INF/3) también figura 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, las observaciones específicas de la Junta de Gobernadores y otras observaciones recibidas de los Estados Miembros.

Examen de la Tecnología Nuclear de 2015

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. Con 438 reactores en funcionamiento, al final de 2014 la energía nuclear tenía una capacidad de generación mundial de 376,2 GW(e). Hubo una sola parada definitiva. Se realizaron cinco nuevas conexiones a la red y se inició la construcción de tres nuevos reactores. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia, especialmente en China. De los 70 reactores en construcción, 46 están en Asia, al igual que 32 de los últimos 40 reactores conectados a la red desde 2004.
2. Treinta países utilizan actualmente energía nucleoelectrica, y un número similar está estudiando o planificando la inclusión de esta energía en su matriz energética, o trabajando ya en ello. De los 30 países que tienen centrales nucleares en funcionamiento, 13 están construyendo nuevas plantas o ultimando proyectos de construcción que se habían suspendido, y 12 están planificando la construcción de nuevas plantas o la terminación de proyectos de construcción suspendidos. Varios países que han decidido introducir la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de la preparación de la infraestructura.
3. Las proyecciones de 2014 del Organismo indican un crecimiento de la capacidad nucleoelectrica de entre el 8 % y el 88 % de aquí a 2030. El crecimiento de la población y de la demanda de electricidad en el mundo en desarrollo, el reconocimiento de la función que desempeña la energía nucleoelectrica en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la importancia de la seguridad del suministro de electricidad y la inestabilidad de los precios de los combustibles fósiles hacen pensar que la energía nuclear será un componente importante de la matriz energética a largo plazo.
4. En todo el mundo se siguieron adoptando medidas para mejorar la seguridad de las centrales nucleares. Ello incluyó la determinación y aplicación de las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi, el aumento de la eficacia de la defensa en profundidad, el fortalecimiento de la capacidad de preparación y respuesta para casos de emergencia, la intensificación de la creación de capacidad y la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante.
5. Aunque los informes indican que hubo gastos considerables en exploración y desarrollo, muchos nuevos proyectos de minería se han retrasado o se retrasarán debido a los bajos precios del uranio. Los recursos de uranio no convencionales amplían aún más la base de recursos, y la investigación sobre la recuperación económica de uranio de los océanos ha dado resultados alentadores.
6. La capacidad mundial de enriquecimiento se mantuvo por encima de la demanda anual total, con niveles relativamente constantes en las otras actividades del ciclo del combustible. Para contribuir al marco de garantía de suministro, se ha realizado un trabajo considerable con respecto a las disposiciones financieras, jurídicas y técnicas para el establecimiento del banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA en Kazajstán.

7. Prácticamente todos los Estados Miembros tienen que gestionar alguna forma de desecho radiactivo. En el Foro Científico celebrado durante la quincuagésima octava reunión ordinaria de la Conferencia General del Organismo, se insistió en la necesidad de un enfoque amplio e integrado, de principio a fin, de la gestión de los desechos radiactivos, y se destacó que ya existían soluciones que se podían aplicar.

8. Debido al aplazamiento de una decisión sobre la política de gestión del combustible gastado en muchos Estados Miembros, la cantidad de combustible gastado almacenado global siguió aumentando. En 2014 se descargaron en total, como combustible gastado de todas las centrales nucleares, alrededor de 10 000 toneladas de metal pesado, lo que elevó la cantidad acumulada de metal pesado a aproximadamente 380 500 t, de las cuales unas 258 700 t están almacenadas en instalaciones situadas ya sea dentro o fuera del emplazamiento de los reactores.

9. La considerable experiencia en la clausura de instalaciones adquirida desde el comienzo del siglo ayudará a acometer el considerable trabajo que habrá que realizar a este respecto en los próximos años: 149 reactores nucleares de potencia del mundo están en régimen de parada definitiva o en fase de clausura, y 17 de ellos ya están completamente clausurados. Algo más de la mitad de los reactores en funcionamiento tienen más de 30 años, y alrededor del 14 % de ellos se construyeron hace más de 40 años. Si bien algunos pueden seguir en funcionamiento hasta los 60 años, muchos serán retirados del servicio en los próximos 20 años. Además, más de 480 reactores de investigación y conjuntos críticos, y varios centenares de otras instalaciones nucleares, por ejemplo de gestión de desechos radiactivos o del ciclo del combustible, han sido clausurados o están en proceso de clausura.

10. Asimismo, algunos países han acumulado competencias y recursos técnicos adecuados para la restauración de las tierras afectadas por las prácticas y los accidentes del pasado, pero muchos programas nacionales aún tropiezan con dificultades importantes para llevar a cabo la labor de restauración. El Japón ha hecho progresos considerables en la restauración de las tierras afectadas por el accidente de Fukushima Daiichi, y ha habido una buena coordinación entre las actividades de restauración, por una parte, y la labor de reconstrucción y revitalización, por otra. Es de la máxima importancia que las lecciones aprendidas de la labor de restauración se den a conocer a la comunidad internacional.

11. La comunidad internacional que mantiene los datos nucleares ha emprendido la tarea de unificar los Archivos de Datos Nucleares Evaluados, que son la columna vertebral de toda la tecnología nuclear, mediante el proyecto titulado Organización Internacional de Colaboración para una Biblioteca de Datos Evaluados (CIELO), de la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). Este proyecto creará archivos únicos para los núcleos de máxima prioridad, a saber, el hidrógeno, el oxígeno, el hierro y los actínidos mayores, que se puedan utilizar en todos los proyectos de evaluación de todas las aplicaciones.

12. En 2014 se pusieron en marcha dos proyectos de aceleradores en gran escala, ambos en Europa. La nueva instalación experimental de técnicas múltiples del Organismo, establecida como estación terminal de la línea de haz de fluorescencia de rayos X en la instalación Elettra de Trieste (Italia), dará acceso a un sincrotrón de última generación a grupos de investigación de los Estados Miembros, especialmente de los que son países en desarrollo.

13. La mayor parte de los 247 reactores de investigación e instalaciones críticas en funcionamiento siguen estando muy subutilizados, y en promedio tienen más de 45 años de antigüedad. Seis países están construyendo nuevos reactores e instalaciones de ese tipo, y varios otros están planificando su construcción o considerando la posibilidad de construirlos. Iniciativas tales como el Reactor-Laboratorio por Internet y el Centro Internacional basado en un Reactor de Investigación designado por el OIEA tienen por objeto promover la cooperación internacional en la formación y la capacitación y el uso eficiente de esas instalaciones.

14. Aunque no hubo escaseces importantes del isótopo de uso médico molibdeno 99 durante 2014, las dificultades operativas en las instalaciones de procesamiento y los reactores de investigación más antiguos no se han resuelto.

15. Prosiguieron las actividades mundiales encaminadas a reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME) en el sector nuclear civil, y 92 de los 200 reactores de investigación comprendidos en el ámbito de aplicación de la Iniciativa para la Reducción de la Amenaza Mundial (IRAM) de los Estados Unidos de América están ya utilizando uranio poco enriquecido (UPE) o se encuentran en régimen de parada confirmado. Al final de 2014, los programas de devolución del combustible de UME de origen estadounidense y ruso se habían ejecutado en un 76 % y un 86 %, respectivamente.

16. Los laboratorios de aplicaciones nucleares del Organismo en Seibersdorf, cerca de Viena, han ayudado a los Estados Miembros a acrecentar su acceso a los usos pacíficos de las tecnologías nucleares desde 1962. Buena parte de esta asistencia se presta a través del programa de cooperación técnica del OIEA, en respuesta directa a las necesidades de los Estados Miembros en áreas tales como la alimentación y la agricultura, la salud humana, el medio ambiente terrestre y la instrumentación nuclear. La nueva iniciativa del Organismo, el proyecto titulado Renovación de los Laboratorios de Aplicaciones Nucleares (ReNuAL), es la primera renovación amplia de los laboratorios desde su establecimiento. El objetivo es modernizarlos y convertirlos en laboratorios aptos para ayudar a los Estados Miembros a hacer frente a los retos mundiales del desarrollo en los próximos dos decenios.

17. Las tecnologías nucleares y relacionadas con la energía nuclear están desempeñando un papel importante en la sanidad animal, particularmente en relación con el diagnóstico de enfermedades y la caracterización de los organismos patógenos.

18. Las vacunas son instrumentos importantes para proteger a los animales y los seres humanos de las enfermedades. Los adelantos recientes en la irradiación de vacunas permiten crear vacunas con microorganismos metabólicamente activos pero que no se replican, y que por lo tanto producen una respuesta del sistema inmunitario parecida a la que provoca la exposición a un agente patógeno vivo.

19. El diagnóstico rápido y precoz es esencial para controlar la propagación de las enfermedades transfronterizas. Aunque las enzimas y las tinciones fluorescentes son eficaces para el diagnóstico y prácticas para el uso sobre el terreno, cuando se requieren altos niveles de sensibilidad y especificidad (por ejemplo para diagnosticar la gripe aviar H5N1, la fiebre aftosa, la fiebre del valle del Rift o la fiebre porcina africana) es preciso recurrir a las técnicas nucleares.

20. El advenimiento de las tecnologías de amplificación de ácidos nucleicos (por ej., la reacción en cadena de la polimerasa) supuso una mejora espectacular en el diagnóstico de las enfermedades infecciosas. La principal ventaja de estas técnicas es que permiten descubrir niveles extremadamente bajos de infección en los animales, pudiendo detectarse el agente patógeno antes de que empiece la enfermedad. La detección temprana de los agentes patógenos es esencial para prevenir los brotes de enfermedades, como el de la enfermedad por el virus del Ébola (EVE) que se produjo en 2014 en África Occidental, el peor brote de este tipo jamás registrado. El Organismo complementó los esfuerzos internacionales ayudando a los Estados Miembros de África a desarrollar o reforzar las capacidades y redes nacionales y regionales para aplicar tecnologías rápidas y exactas de diagnóstico y control. Una de esas plataformas tecnológicas, la reacción en cadena de la polimerasa con transcripción inversa (RT-PCR), está reconocida como una técnica rápida y eficiente para diagnosticar la EVE.

21. La técnica del análisis de isótopos estables puede proporcionar el medio para entender la epidemiología de las enfermedades zoonóticas. El uso de los isótopos estables para caracterizar una población entraña el examen de las firmas isotópicas de unos pocos individuos que sean

representativos de la población completa. Una vez que se conoce el perfil isotópico de una determinada población, cualquier individuo de la población puede proporcionar información sobre la migración mundial de esa especie.

22. La medición efectiva de la dosis de radiación a que se expone a un paciente durante la radioterapia y el radiodiagnóstico es importante ya sea para verificar que el tratamiento se está administrando como se ha prescrito o para estimar el riesgo que entraña la exposición del paciente a la radiación durante un procedimiento de imagenología médica.

23. La imagenología de diagnóstico con rayos X comprende una variada gama de exámenes, desde la simple radiografía de proyección hasta la imagenología dinámica avanzada de cortes transversales. Ello ha dado lugar a un amplio abanico de cantidades dosimétricas, instrumentos de medición y técnicas, que suponen un reto para las personas que trabajan en entornos clínicos.

24. Un requisito fundamental del proceso de radioterapia es que existan procedimientos y patrones dosimétricos de referencia coherentes. Actualmente se están elaborando nuevos patrones y directrices para seguir el ritmo de los adelantos en las técnicas y la tecnología de la radioterapia.

25. Recientemente han aumentado las técnicas de radioterapia que utilizan campos pequeños, lo que ha acrecentado la incertidumbre de la dosimetría clínica y ha puesto en tela de juicio la idoneidad de la aplicación de los protocolos de dosimetría de referencia existentes, que se elaboraron para campos más grandes. Se está preparando un código de práctica que normalizará la dosimetría en campos pequeños.

26. Las cámaras calibradas de tipo pozo son el dosímetro preferido para la calibración de las fuentes radiactivas utilizadas en la braquiterapia. Sin embargo, no existen directrices internacionales armonizadas para la garantía y/o el control de calidad de todas las fuentes que se emplean en la braquiterapia, ni tampoco de toda la instrumentación dosimétrica recomendada para ello. Se están desplegando esfuerzos para establecer patrones de dosis absorbida en agua, a fin de lograr la armonización con los códigos de práctica para la dosimetría en la radioterapia externa.

27. Ha habido avances impresionantes en el desarrollo de las tecnologías de producción de radioisótopos, lo que ha permitido un acceso más amplio a varios radionucleidos nuevos, como el galio 68, el cobre 64, el circonio 89 y el zinc 63, y ha facilitado el desarrollo de tecnologías basadas en aceleradores para la producción comercial de tecnecio 99m, que sigue siendo el radionucleido más ampliamente utilizado con fines de diagnóstico. La disponibilidad de nuevos radioisótopos para aplicaciones médicas podría resolver problemas clínicos hasta ahora insospechados. Estos adelantos están modificando radicalmente el panorama de la medicina nuclear.

28. La necesidad de garantizar el acceso a agua potable salubre, así como a un abastecimiento adecuado de agua dulce para el saneamiento, la producción de alimentos y la generación de energía, sigue siendo un reto para muchos países. En los últimos años, nuevos enfoques e instrumentos basados en el uso de isótopos, junto con algunos avances analíticos innovadores, han contribuido a ampliar sustancialmente el uso de isótopos ambientales para entender, monitorizar y evaluar los efectos del cambio climático en el agua y en otros recursos naturales.

29. La evaluación completa de los recursos hídricos por medios científicos es de importancia decisiva para el desarrollo sostenible. La aparición de instrumentos más sencillos y baratos que utilizan rayos láser y requieren poco mantenimiento está contribuyendo a la expansión de las aplicaciones basadas en isótopos estables. Se prevé que en el futuro próximo se mantendrá la demanda de los instrumentos isotópicos más nuevos para la datación del agua subterránea, que emplean métodos analíticos más sofisticados para medir isótopos de gases nobles y radionucleidos de período largo.

30. Los aumentos del dióxido de carbono atmosférico (CO₂) están afectando gradualmente al medio ambiente marino. Los radionucleidos ofrecen un medio poderoso para entender los cambios en el ciclo del carbono y sus efectos en los organismos. También se pueden utilizar para reconstruir los paleocambios en la química del agua del mar, al objeto de comprender los cambios que se están produciendo en el presente y la forma en que pueden afectar a los océanos en el futuro.

31. Cuando los océanos absorben más CO₂, el agua se acidifica y ello a su vez afecta a los organismos marinos. Mediante el uso de radioisótopos se están investigando las modificaciones en algunos procesos de los organismos marinos, como la calcificación, la biomineralización y el metabolismo, en respuesta a la creciente acidez.

32. Las técnicas nucleares y de isótopos estables permiten reconstruir los episodios de contaminación del pasado, determinar las tendencias de la contaminación y evaluar la eficacia de las medidas de control correspondientes. Esas técnicas se emplean también para estudiar las fuentes terrestres de contaminación con nutrientes que causan la eutrofización costera, distinguir entre las concentraciones de contaminantes antropógenas y naturales, determinar las fuentes de contaminantes para los estudios forenses de la contaminación y detectar las biotoxinas relacionadas con floraciones de algas nocivas.

33. La contaminación de las aguas costeras con petróleo es un problema ambiental en todo el mundo, causado por las descargas de estos hidrocarburos. Hay una creciente necesidad de métodos sensibles y fiables para monitorizar la contaminación por petróleo y sus efectos, así como de métodos que permitan determinar el origen de la contaminación por petróleo para hacer cumplir la reglamentación. El análisis de las relaciones de los isótopos estables del carbono en los hidrocarburos del petróleo se usa, en combinación con métodos químicos, para establecer con más precisión la marca isotópica de las mareas negras y encontrar las fuentes del petróleo presente en el medio marino.

Examen de la Tecnología Nuclear de 2015

Informe

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. Al 31 de diciembre de 2014, había 438 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 376,2 GW(e)¹ (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa un ligero aumento, de unos 4,5 GW(e), de la capacidad total con respecto a 2013.

2. De los reactores en funcionamiento, alrededor del 81,5 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, un 11,2 % son reactores moderados y refrigerados por agua pesada, un 3,4 % son reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito, y un 3,4 % son reactores refrigerados por gas (figura A-1). Dos son reactores rápidos refrigerados por metal líquido.

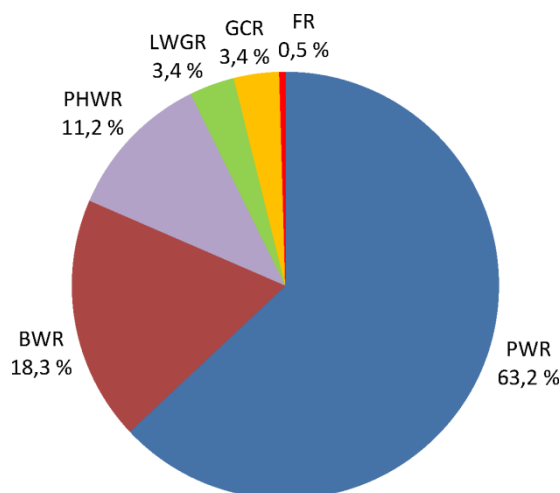


Fig. A-1. Distribución actual de los tipos de reactores. (BWR: reactor de agua en ebullición; FR: reactor rápido; GCR: reactor refrigerado por gas; LWGR: reactor refrigerado por agua ligera y moderado por grafito; PHWR: reactor de agua pesada a presión; PWR: reactor de agua a presión).

3. En el Japón, las 48 unidades de reactores operacionales permanecieron inactivas en 2014. En noviembre de ese año, el gobernador de la Prefectura de Kagoshima aprobó la nueva puesta en marcha de Sendai-1 y 2, las primeras unidades del país en recibir el visto bueno de la autoridad reguladora nuclear de conformidad con las nuevas normas de seguridad impuestas después del accidente de Fukushima Daiichi de marzo de 2011. En diciembre de 2014, la Autoridad de Reglamentación Nuclear del Japón aprobó la nueva puesta en funcionamiento de las unidades de reactor 3 y 4 de Takahama.

4. En 2014 se conectaron a la red cinco nuevos reactores: Atucha-2 (692 MW(e)), en la Argentina; Ningde-2 (1018 MW(e)), Fuqing-1 (1000 MW(e)) y Fangjiashan-1 (1000 MW(e)), en China, y Rostov-3 (1011 MW(e)) en Rusia. La construcción de la unidad de reactor Atucha-2 había empezado originalmente en 1981, pero fue retrasada y no se reactivó hasta 2009.

¹ Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

5. En 2014 hubo una sola parada definitiva. Las operaciones comerciales de la única unidad de Vermont Yankee, en los Estados Unidos de América, cesaron el 29 de diciembre de 2014 por cuestiones financieras.

6. Solo se iniciaron tres construcciones en 2014: Belarusian-2 en Belarús, Barakah-3 en los Emiratos Árabes Unidos, y CAREM-25, un prototipo pequeño e integral de reactor de agua ligera a presión, en la Argentina.

7. Al 31 de diciembre de 2014 había 70 reactores en construcción. Como en años anteriores, la expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen centradas en Asia (figura A-2), especialmente en China. Del número total de reactores en construcción, 46 están en Asia, al igual que 32 de los últimos 40 reactores nuevos conectados a la red desde 2004.

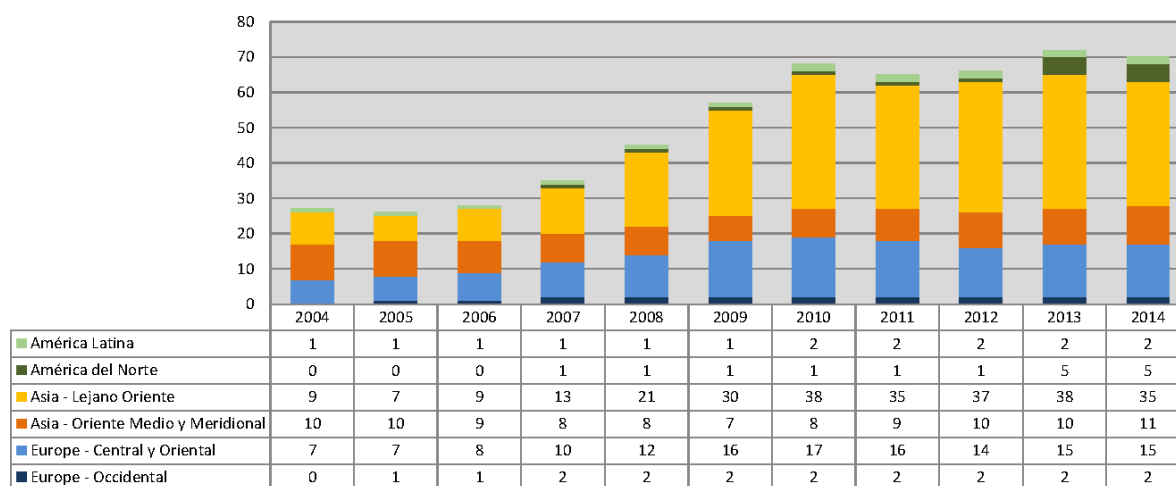


Fig. A-2. Número de reactores en construcción, por regiones.

8. En 2014, varios países hicieron progresos considerables en el establecimiento de sus primeras centrales nucleares. En los Emiratos Árabes Unidos, la Autoridad Federal de Reglamentación Nuclear aprobó la solicitud de la Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos para la construcción de dos nuevas unidades en el emplazamiento de Barakah. Las Unidades 1, 2 y 3 de Barakah ya están en construcción y se espera que entren en funcionamiento en 2017, 2018 y 2020, respectivamente.

9. Belarús realizó el primer vertido de hormigón para su segunda unidad en abril de 2014, y ha pasado a la etapa de las obras en la superficie en la construcción de la Unidad 1. Las dos unidades son reactores WWER-1200 que se construirán en virtud del contrato firmado con Atomstroyexport de la Federación de Rusia en julio de 2012.

10. Turquía sigue desarrollando la infraestructura de su programa de energía nucleoelectrónica. En diciembre de 2014, el Ministerio de Medio Ambiente y Planificación Urbana aprobó la evaluación del impacto ambiental de las cuatro unidades WWER-1200 propuestas para Akkuyu. En octubre de 2014, el órgano regulador turco contrató a una organización de apoyo técnico para que le preste asistencia en el examen y la evaluación de la solicitud de licencia para la construcción en Akkuyu, que se presentará en 2015. Tras la firma de un acuerdo intergubernamental con el Japón en 2013, Turquía está trabajando también en el proyecto de una segunda central nuclear en Sinop y, en cooperación con sus asociados, ha iniciado las investigaciones sobre el emplazamiento y la preparación de un estudio de viabilidad técnica.

11. En enero, el Consejo de Ministros de Polonia confirmó la decisión de introducir una capacidad nuclear de aproximadamente 6000 MW(e) en la matriz energética, con planes de poner en funcionamiento la primera unidad en 2024 a más tardar.

12. En 2013, Viet Nam realizó los estudios de viabilidad de dos emplazamientos para centrales nucleares en Ninh Thuan, con una capacidad total de 4000 MW(e). En noviembre de 2014, Viet Nam

recibió una misión de seguimiento del Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) que proporcionó retroinformación sobre el avance en las medidas adoptadas para el desarrollo de su infraestructura nuclear. Kenya, Marruecos y Nigeria solicitaron oficialmente la programación de misiones INIR para 2015.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (a 31 de diciembre de 2014)^a.

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2014		Experiencia operacional total hasta 2014	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidad	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	9	12 074			91,8	15,8	808	1
ARGENTINA	3	1 627	1	25	5,3	4,1	73	2
ARMENIA	1	375			2,3	30,7	40	8
BELARÚS			2	2 218				
BÉLGICA	7	5 927			32,1	47,5	268	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	14,5	2,9	47	3
BULGARIA	2	1 926			15,0	31,8	157	3
CANADÁ	19	13 500			98,6	16,8	674	6
CHINA	23	19 007	26	25 756	123,8	2,4	181	7
COREA, REPÚBLICA DE	23	20 717	5	6 370	149,2	30,4	450	1
EMIRATES ÁRABES UNIDOS			3	4 035				
ESLOVAQUIA	4	1 814	2	880	14,4	56,8	152	7
ESLOVENIA	1	688			6,1	37,3	33	3
ESPAÑA	7	7 121			54,9	20,4	308	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	99	98 639	5	5 633	798,6	19,5	4 012	4
FEDERACIÓN DE RUSIA	34	24 654	9	7 371	169,1	18,6	1 157	3
FINLANDIA	4	2 752	1	1 600	22,6	34,7	143	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	418,0	76,9	1 990	4
HUNGRÍA	4	1 889			14,8	53,6	118	2
INDIA	21	5 308	6	3 907	33,2	3,5	418	6
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL	1	915			3,7	1,5	3	4
JAPÓN	48	42 388	2	2 650	0,0	0,0	1 694	4
MÉXICO	2	1 330			9,3	5,6	45	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,9	4,0	70	0
PAKISTÁN	3	690	2	630	4,6	4,3	61	8
REINO UNIDO	16	9 373			57,9	17,2	1 543	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 904			28,6	35,8	140	10
RUMANIA	2	1 300			10,8	18,5	25	11
SUDÁFRICA	2	1 860			14,8	6,2	60	3
SUECIA	10	9 470			62,3	41,5	422	6
SUIZA	5	3 333			26,5	37,9	199	11
UKRANIA	15	13 107	2	1 900	83,1	49,4	443	6
Total ^{b, c}	438	376 216	70	68 450	2 410,4		16 096	10

a. Datos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<http://www.iaea.org/pris>).

b. Nota: Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China):

6 unidades, 5032 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e) en construcción;

40,8 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 18,9 % del total de electricidad generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (200 años y 1 mes).

13. Varios países que han decidido introducir la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de la preparacion de la infraestructura. Tras suscribir en 2011 un acuerdo intergubernamental de cooperacion con la Federacion de Rusia para construir la central nuclear de Rooppur, que tiene dos unidades, Bangladesh emprendió en 2013 los trabajos preparatorios en el emplazamiento y tiene previsto iniciar la construccion en 2016. En octubre de 2013, Jordania seleccionó a Atomstroyexport, de la Federacion de Rusia, como proveedor preferido y ahora está trabajando en la caracterización del emplazamiento de Amra. Una misión INIR realizada en agosto de 2014 concluyó que Jordania había hecho progresos en el desarrollo de su infraestructura nuclear y recomendó nuevas medidas.

14. Varios países siguen estudiando la posibilidad de introducir la energía nucleoelectrica. Algunos se están preparando activamente para tomar una decisión fundamentada sobre la posible ejecución de un programa nucleoelectrico, y varios de ellos están elaborando estrategias energéticas que incluyen la opción de ese tipo de energía. De momento, el interés se centra en crear la amplia infraestructura jurídica y de reglamentación necesaria para un programa nucleoelectrico, además de formar a los recursos humanos que se precisan.

15. La creación de capacidad sigue siendo importante a fin de asegurar la disponibilidad ininterrumpida de personal competente para la gestión segura y sostenible, o la eliminación paulatina, de un programa nucleoelectrico. La importancia de la creación de capacidad se puso de relieve también en el Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear (aprobado por la Conferencia General en 2011), en el que se exhortó a los Estados Miembros con programas nucleoelectricos, y a los que tuvieran previsto iniciar un programa de ese tipo, a fortalecer, desarrollar, mantener y ejecutar programas de creación de capacidad. En la Conferencia Internacional sobre el Desarrollo de Recursos Humanos para los Programas Nucleoelectricos: Creación y Mantenimiento de Capacidad, celebrada por el Organismo en Viena en mayo de 2014, más de 300 participantes procedentes de 65 Estados Miembros y 5 organizaciones internacionales examinaron los retos mundiales de la creación de capacidad y destacaron la importancia de asegurar una oferta sostenible de recursos humanos cualificados.

16. Los artículos falsificados, fraudulentos y sospechosos se están convirtiendo en un motivo de preocupación creciente para las organizaciones explotadoras y los reguladores, y se están detectando casos de falsificación, fraude o prácticas sospechosas en relación con artículos y con la documentación de calidad conexas. Algunas centrales nucleares en funcionamiento o en construcción han sufrido importantes repercusiones económicas, incluida la parada temporal de la planta, como consecuencia del uso de esos artículos. Las organizaciones explotadoras están adoptando un mayor número de medidas preventivas, que incluyen un aumento de la sensibilización y la capacitación, una mejora de las especificaciones e inspecciones de las compras y un menor uso de intermediarios. En medida creciente, los reguladores están exigiendo la notificación de los artículos falsificados, fraudulentos y sospechosos, incluidos los que se detectan antes de la instalación en la central. Para ayudar a hacer frente a este problema, el Organismo celebró en septiembre de 2014 una reunión técnica sobre las actividades de compra y los artículos falsificados, fraudulentos o sospechosos. También ha comenzado a elaborar directrices técnicas sobre la ingeniería de compras, que incluyen recomendaciones para evitar el uso de artículos falsificados, fraudulentos y sospechosos.

17. De los 438 reactores de potencia en funcionamiento, 225 llevan 30 años o más en servicio (véase la figura A-3). Hay modelos de gestión de la vida útil de las centrales para la explotación a largo plazo, más allá del período de la licencia. Un modelo, que se aplica en los Estados Unidos de América y en algunos otros Estados Miembros, se basa en el concepto de la solicitud de renovación de la licencia. En este modelo, la autoridad competente expide una licencia de explotación por un período de hasta 40 años, que puede renovarse por un máximo de 20 años por cada solicitud de renovación. Al final de 2014, un total de 73 de los 99 reactores en funcionamiento en los Estados Unidos habían recibido una renovación de la licencia por 20 años. Otro modelo de concesión de licencias, que se basa en el proceso del examen periódico de la seguridad (PSR), se aplica principalmente para los reactores de Europa. En

este caso, el titular de la licencia debe efectuar el proceso del PSR a intervalos regulares, generalmente cada diez años, para confirmar el cumplimiento de los términos de la licencia y de las condiciones ambientales. El PSR es un examen completo de todos los aspectos importantes de la seguridad, destinado a detectar y abordar las deficiencias sobre la base de los requisitos actuales para la concesión de licencias. Uno de los mayores retos para la explotación a largo plazo es la elaboración y ejecución de programas de gestión del envejecimiento para evaluar la integridad de las estructuras esenciales, los sistemas y la vida útil restante de los componentes críticos. El Organismo ha elaborado una guía programática y numerosas guías sobre componentes específicos para la gestión del envejecimiento.

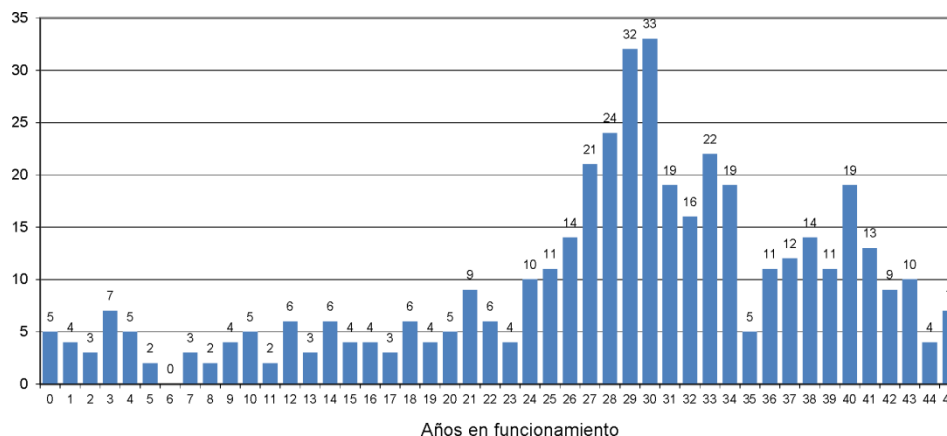


Fig. A-3. Distribución de los reactores de potencia en funcionamiento según la antigüedad al 31 de diciembre de 2014 (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (<http://www.iaea.org/pris>) del Organismo).

18. Las unidades Doel-3 y Tihange-2 de Bélgica fueron puestas en régimen de parada en 2012, al descubrirse defectos en las vasijas de presión de los reactores (VPR). Tras una investigación minuciosa y una vez cumplidos los requisitos reglamentarios, las unidades se volvieron a poner en funcionamiento en mayo de 2013. Sin embargo, después de realizar nuevas pruebas metalúrgicas, la compañía, Electrabel, las volvió a colocar en régimen de parada en marzo de 2014, hasta que se despejaron las incertidumbres relativas al efecto de los neutrones en la resistencia mecánica del acero de la VPR. Para dar a conocer las enseñanzas extraídas sobre la integridad estructural, el Organismo organizó un curso de capacitación, dictado en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid (España) en septiembre de 2014, sobre la evaluación de los mecanismos de degradación de los principales componentes de las centrales nucleares.

19. Las revaluaciones de la seguridad tras el accidente de Fukushima Daiichi han dado lugar, en muchos casos, a un gasto de capital adicional para cumplir los nuevos requisitos reglamentarios. Ello repercutirá en el costo de la generación de energía nucleoelectrónica y podría tener un impacto en la sostenibilidad económica de la explotación a largo plazo. Para evaluar los efectos económicos, el Organismo ha comenzado a preparar una nueva guía técnica sobre los métodos de evaluación económica de la explotación a largo plazo de las centrales nucleares.

A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrónica

20. Según las proyecciones de 2014 del Organismo, la capacidad nucleoelectrónica, actualmente de 372 GW(e), habrá aumentado en 2030 a 401 GW(e) en el escenario de crecimiento bajo, y a 699 GW(e) en el de crecimiento alto. Estas cifras indican un crecimiento positivo del 8 % y el 88 % en los escenarios bajo y alto, respectivamente. Las proyecciones de 2014 son inferiores a las de 2013 en alrededor de 23 GW(e) en el caso de la proyección alta, y en 34 GW(e) en el de la baja². Los

² Las proyecciones comprenden tanto la capacidad disponible (que suministra actualmente electricidad a la red) como la capacidad nominal instalada (disponible, pero que actualmente no suministra electricidad a la red).

factores que contribuyeron a esta merma fueron la retirada de servicio de algunos reactores antes de lo previsto, los retrasos en los nuevos proyectos de construcción, y los costos añadidos atribuibles a la aplicación de modificaciones adicionales relacionadas con la seguridad. Sin embargo, el interés en la energía nucleoelectrica sigue siendo grande en algunas regiones, particularmente en los países con economías en desarrollo y crecientes necesidades de energía. La continuación del crecimiento indica que los factores básicos que respaldan el uso de la energía nucleoelectrica no han cambiado.

21. Estas proyecciones se derivan de la agregación de las evaluaciones de los distintos países. Los expertos examinan todos los reactores en funcionamiento, las posibles prórrogas de licencias, las paradas programadas y los proyectos de construcción verosímiles previstos para los próximos decenios en los Estados Miembros del Organismo. Las proyecciones se preparan evaluando la plausibilidad de cada proyecto a la luz de los supuestos generales utilizados en los escenarios bajo y alto. No pretenden ser predictivas, ni reflejan toda la gama de posibles escenarios futuros, desde los casos viables más bajos hasta los más altos.

22. A breve plazo, se prevé que el bajo precio del gas natural y la capacidad creciente de las fuentes de energía renovable subvencionadas afectarán a las perspectivas de crecimiento de la energía nucleoelectrica en algunas regiones del mundo desarrollado. Esta depresión de los precios del gas natural se debe, en parte, a la baja demanda causada por las condiciones macroeconómicas, así como a los avances tecnológicos. Además, la actual crisis financiera sigue dificultando la ejecución de proyectos con gran densidad de capital, como los de producción de energía nucleoelectrica. El supuesto en que se basaron los expertos fue que estas dificultades, junto con el accidente de Fukushima Daiichi, podrían retrasar temporalmente el despliegue de algunas centrales nucleares. Los factores básicos, es decir, el crecimiento de la población y de la demanda de electricidad en el mundo en desarrollo, el reconocimiento de la función que desempeña la energía nuclear en la reducción de las emisiones de CO₂, las cuestiones relativas a la seguridad del suministro de energía y la inestabilidad de los precios de los combustibles fósiles, hacen pensar que la energía nuclear seguirá siendo un componente importante de la matriz energética a más largo plazo.

Las emisiones de CO₂ ya evitadas con la energía nucleoelectrica³

La energía nucleoelectrica contribuye al suministro de electricidad en el mundo desde hace más de 50 años. Como ventaja añadida, este tipo de energía evita la emisión de CO₂. La figura A-4 muestra las tendencias históricas de las emisiones mundiales de CO₂ producidas por el sector eléctrico y las emisiones evitadas gracias al uso de energía hidroelectrica y nucleoelectrica y de otras fuentes de energía renovable. El sector eléctrico, en la parte inferior del gráfico, representa las emisiones de CO₂ efectivamente producidas en los últimos 40 años. Los valores incrementales que aparecen encima de los valores efectivos representan las emisiones evitadas mediante el uso energía nucleoelectrica, hidroelectrica y renovable, que en 2011 sumaron casi 6 gigatoneladas (Gt), un ahorro de un tercio en las emisiones de CO₂ en comparación con lo que habría sido el total sin esas formas de energía. Se calcula que algo más de un tercio (2,1 Gt) de este ahorro de emisiones de CO₂ se debe a la energía nucleoelectrica.

Estas estimaciones de las emisiones evitadas dependen de los supuestos que se utilicen con respecto a las fuentes de energía eléctrica que se habrían empleado en sustitución. Para estimar las emisiones evitadas se supuso que la electricidad correspondiente se habría producido aumentando la generación a partir del carbón, el petróleo y el gas natural en proporción con sus respectivas aportaciones a la matriz de electricidad. Esta es una estimación por lo bajo, ya que es más probable que la energía nucleoelectrica se hubiera sustituido por electricidad producida en centrales a carbón, debido a la abundancia de este combustible en los países.

³ Puede consultarse más información sobre la energía nucleoelectrica y el cambio climático en <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/publications.html>.

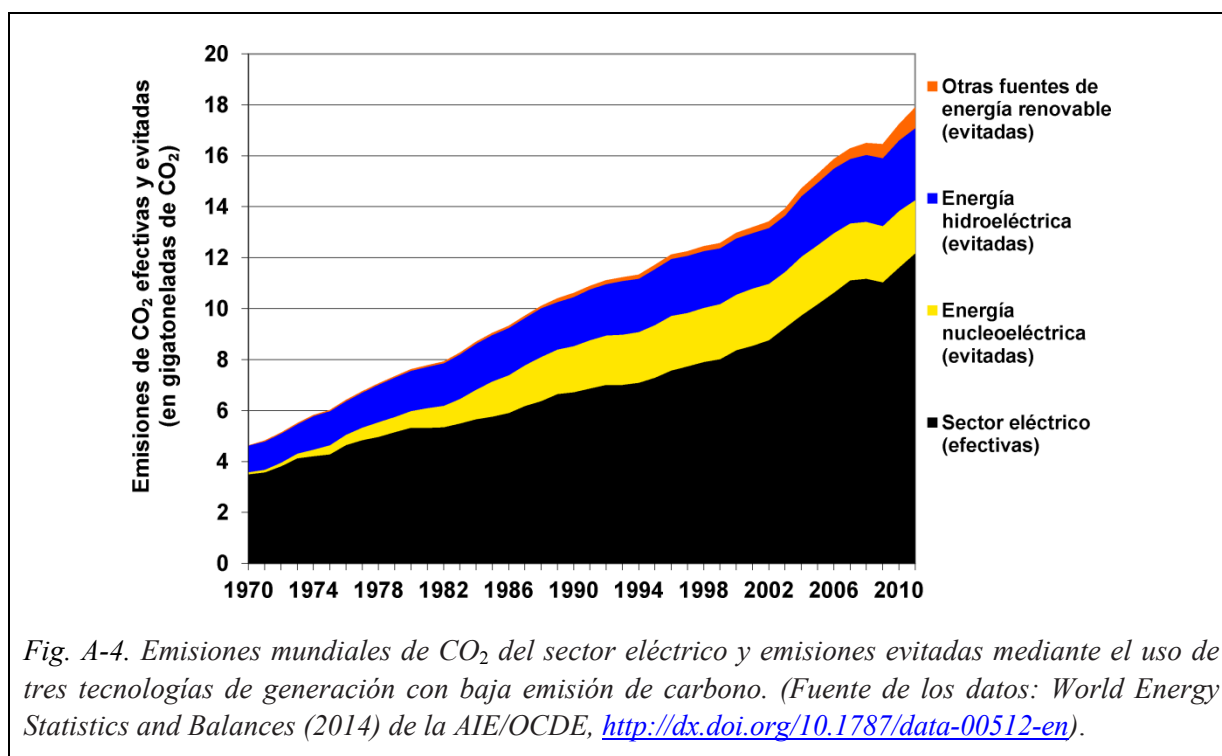


Fig. A-4. Emisiones mundiales de CO₂ del sector eléctrico y emisiones evitadas mediante el uso de tres tecnologías de generación con baja emisión de carbono. (Fuente de los datos: World Energy Statistics and Balances (2014) de la AIE/OCDE, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>).

23. La Agencia Internacional de Energía de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AIE/OCDE) también publica proyecciones del crecimiento mundial de la energía nucleoelectrónica. Según la publicación de la AIE/OCDE *World Energy Outlook 2014*, en el escenario central, denominado “escenario de nuevas políticas”, la capacidad de generación nucleoelectrónica mundial llegaría a 543 GW(e) en 2030. Esta proyección se mantuvo prácticamente igual con respecto al año anterior y es un valor muy próximo al promedio de las proyecciones del OIEA. En la figura A-5 se comparan las proyecciones del OIEA de 2014, los escenarios de la AIE/OCDE de 2014⁴ y las proyecciones de la Asociación Nuclear Mundial (WNA) de 2013. Los escenarios de crecimiento alto de las tres organizaciones para 2020 y 2030 dan resultados parecidos, mientras que los de crecimiento bajo para 2030 arrojan un grado de variación relativamente elevado.

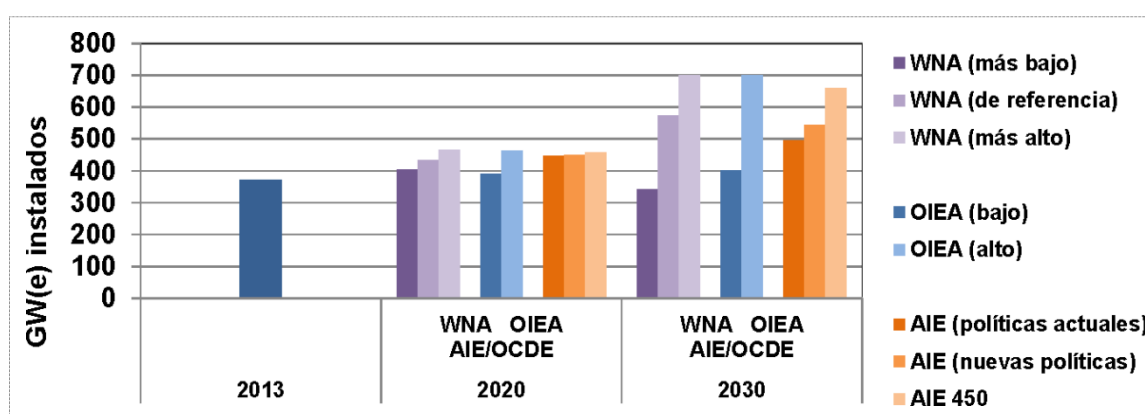


Fig. A-5. Comparación de las proyecciones de la energía nucleoelectrónica del OIEA y las proyecciones de la AIE de 2014 —basadas en el total de GW(e)— y de la WNA de 2013.

⁴ Las cifras de la AIE/OCDE se basan en el total de GW(e).

A.3. Ciclo del combustible

A.3.1. Recursos y producción de uranio

24. Los precios al contado del uranio siguieron bajando entre el comienzo y la mitad del año, pasando de aproximadamente 90 dólares/kg a 70 dólares/kg, el nivel más bajo en diez años. Sin embargo, en agosto de 2014 los precios comenzaron a recuperarse y en noviembre alcanzaron los 115 dólares/kg, antes de bajar un poco al final del año. Aunque los informes indican que hubo gastos considerables en exploración y desarrollo, muchos nuevos proyectos de minería se han retrasado o tienen altas probabilidades de retrasarse.

25. Los recursos de uranio no convencionales amplían aún más la base de recursos. Las estimaciones actuales cifran el uranio potencialmente recuperable en forma de productos secundarios menores en alrededor de ocho megatoneladas (Mt). En 2014, PhosEnergy anunció que el funcionamiento continuo de su Planta de Demostración del Proceso PhosEnergy *in situ* había demostrado que las tasas de recuperación de uranio podían mantenerse sistemáticamente altas (superiores al 92 %) durante las operaciones en régimen estable. El proyecto de fosfato/uranio del Brasil en Santa Quitéria está todavía en desarrollo y el comienzo de la producción está programado para 2016.

26. Se han hecho amplias investigaciones sobre el agua de mar como fuente no convencional de uranio. Hay unos 4500 millones de toneladas de uranio, un enorme recurso energético, disueltos en los océanos del mundo a concentraciones muy bajas, de alrededor de 3,3 partes por mil millones. Esta fuente potencial de uranio se sigue investigando. Avances recientes en la labor de investigación y desarrollo (I+D) del Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos han dado lugar a una reducción de los costos de recuperación del orden del 50 %, de 1230 dólares/kg de uranio a 610 dólares/kg.

27. Los recursos mundiales de torio se estiman en unos seis a siete millones de toneladas. Aunque el torio se ha utilizado como combustible en operaciones de demostración, se requerirá todavía un trabajo sustancial antes de que pueda tomarse en consideración para su uso comercial. Se prevé que en el futuro próximo entrarán en la fase de producción, especialmente en Kvanefjeld, Groenlandia (Reino de Dinamarca), algunos proyectos con elementos de tierras raras que podrían producir torio como producto secundario y residuos que contengan torio. Thor Energy continuó su programa quinquenal de prueba del combustible de óxidos mixtos (MOX) con torio en Halden (Noruega).

28. La WNA estima que la producción de uranio fue de 58 394 t en 2012 y de 59 370 t en 2013. En 2014 se esperaba que la capacidad de producción de uranio aumentase en unas 7530 toneladas, con la apertura de la mina de Cigar Lake en el Canadá y de la mina Four Mile en Australia, el inicio de la producción de uranio como producto secundario de la producción de níquel en Talvivaara (Finlandia) y la puesta en marcha de dos nuevas minas de lixiviación *in situ* en los Estados Unidos de América. Sin embargo, el aumento real será menor, porque el proyecto de Talvivaara está suspendido y las operaciones de extracción en la mina de Cigar Lake están temporalmente interrumpidas por razones tecnológicas.

29. Se prevé que la proporción de la producción obtenida por lixiviación *in situ*, que aún es el método predominante, seguirá aumentando a mediano plazo. La WNA ha informado de que la extracción por lixiviación *in situ* representó alrededor del 46 % de la producción mundial en 2013, que procedió principalmente de Kazajstán (el 38 % de la producción mundial total de ese año). Debido a las condiciones desfavorables del mercado, la explotación de nuevos yacimientos en Kazajstán ha quedado en suspenso y la producción de uranio de 2014 de este país se mantendrá en el nivel de 2013, de 22 500 toneladas.

30. La mina de Cigar Lake del Canadá inició la producción en marzo. Sin embargo, debido a la persistencia de algunos problemas tecnológicos, las operaciones mineras se suspendieron temporalmente en julio de 2014. La capacidad de producción anual es actualmente de 5000 t de uranio, y se prevé que aumentará a más de 8000 t por año a partir de 2018. El primer concentrado de

uranio de la mena extraída en Cigar Lake se produjo en la fábrica del lago McClean en octubre de 2014 (figura A-6). La fábrica está solicitando ahora la aprobación para aumentar la capacidad autorizada a 9200 toneladas de uranio. La solicitud de autorización para construir y explotar una nueva mina subterránea de uranio en la cuenca de Athabasca, en el norte de Saskatchewan, como parte del Proyecto de Extracción de Uranio del Milenio, ha sido retirada oficialmente, aduciendo las malas condiciones del mercado mundial.



Fig. A-6. En el Canadá, la fábrica del lago McClean produjo el primer concentrado de uranio a partir de la mena extraída en Cigar Lake. (Fotografía: Corporación Cameco).

31. En Namibia, debido a las condiciones del mercado, todas las minas y fábricas actualmente activas están reduciendo la producción y, salvo en Husab, todos los proyectos de desarrollo minero han quedado suspendidos hasta que mejoren las condiciones del mercado. En la mina de Husab prosiguen las obras de construcción, y está previsto iniciar las operaciones en 2015, para alcanzar la plena capacidad de producción, de 5770 toneladas de uranio, posiblemente en 2017. En Rössing se reanudaron las operaciones de procesamiento, tras una breve interrupción debida a un fallo en un tanque de lixiviación. La Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) compró el 25 % de la mina de uranio Langer Heinrich de Namibia.

32. La explotación de una nueva mina en el Níger, Imouraren, con una capacidad de 5000 toneladas de uranio, que debía comenzar en 2015, se aplazará probablemente hasta 2017 debido a las condiciones del mercado. El Proyecto Madaouela podría iniciar la producción ya en 2017, con capacidad para producir 1040 toneladas de uranio por año, a partir de sus recursos estimados en 39 600 t de U, con otras 11 260 t en el yacimiento Miriam, que puede explotarse a cielo abierto.

33. En mayo de 2014, la depresión de los precios del mercado condujo a una interrupción de la producción en la mina de uranio de Kayelekera de la empresa Paladin, en Malawi. Cuando mejoren los precios del mercado, la producción podría recomenzar tras un período de preparación de nueve meses aproximadamente. El yacimiento de uranio de Letlhakane en Botswana está siendo objeto de un estudio de viabilidad detallado, que se espera concluir en 2015, conforme a los planes, y el comienzo de la producción está previsto para 2017. En la República Islámica de Mauritania se ha ultimado un estudio exploratorio para determinar el alcance del proyecto de uranio de Reguibat.

34. En Australia, Quasar Resources dio inicio a las operaciones de extracción por lixiviación in situ en los yacimientos de Four Mile East. La Autoridad de Protección Ambiental de Australia Occidental recomendó la aprobación estatal del proyecto conjunto Cameco–Mitsubishi en Kintyre. La decisión de proceder al desarrollo dependerá de las condiciones del mercado en el futuro. En la mina Ranger, que había sufrido la ruptura de un tanque de lixiviación a finales de 2013, las operaciones de procesamiento de la mena almacenada se reanudaron en junio de 2014. El inicio de la producción en el área denominada Ranger-3 Deeps está previsto para 2015. Olympic Dam está planificando una prueba de lixiviación en pila de menas de cobre y uranio como alternativa de bajo costo al plan de ampliación inicial, que se abandonó en 2012.

35. En los Estados Unidos de América, el proyecto de Lost Creek, en Wyoming, inició la producción en 2014.

36. El Brasil prevé comenzar en 2015 una nueva operación de extracción a cielo abierto en los yacimientos de Engenho. Se espera que esta mina produzca alrededor de 286 toneladas de uranio por año. La mena se procesará en la fábrica de Caetité ya existente, que también está previsto ampliar para producir en total 670 t de uranio por año a partir de 2015.

37. En Turquía, se han ultimado los estudios de previabilidad del proyecto de lixiviación in situ de Temrezli, y se han concedido las licencias necesarias para la fase de desarrollo. Se prevé que la producción comenzará en 2016, con una cantidad anual de 385 t de uranio. En abril de 2014 se concedió una licencia de extracción genérica para una mina de uranio en Retortillo (España), que podría dar lugar a una licencia de instalación del ciclo del combustible nuclear si durante el proceso de concesión de licencias se verificase su conformidad con la reglamentación nuclear. Rumania tiene la intención de abrir una nueva mina de uranio en el este del país, ya que los recursos de la mina que se explota actualmente en Crucea están agotados.

38. Jordania tiene planes de invertir 140 millones de dólares en un proyecto de extracción de uranio, tras un anuncio de reevaluación de los recursos en el centro del país. El proyecto tendrá una capacidad inicial de 300 a 400 toneladas de uranio por año, que podrán ampliarse a 1500 toneladas anuales, y se prevé que entrará en funcionamiento dentro 4 o 5 años.

39. En Groenlandia (Reino de Dinamarca), se está efectuando un estudio de viabilidad para evaluar la producción de uranio, elementos de tierras raras y zinc en Kvanefjeld. Si el proyecto avanza conforme a los planes, se pronostica que producirá 425 toneladas de uranio por año como producto secundario a partir de 2016.

40. La República Islámica del Irán anunció que la mina de uranio de Saghand se encuentra en las últimas fases del desarrollo. El uranio se extraerá con métodos de minería a cielo abierto y subterránea y la mena extraída se procesará en la fábrica cercana a Ardakan.

41. La WNA estima que la producción de uranio de 2014 cubrió aproximadamente el 92 % del consumo estimado de uranio en los reactores, que fue de 70 015 toneladas. Este porcentaje es mucho mayor que el de los últimos años, debido principalmente a la desaparición de una importante fuente de suministro secundaria derivada de las existencias militares, conocida comúnmente como el “trato del UME” o el programa “De megatones a megavatios”, que concluyó en 2013. El restante 8 % se cubrió con cuatro fuentes secundarias: las reservas de uranio enriquecido, el uranio recuperado mediante el reprocesamiento de combustible gastado, el combustible de MOX con uranio 235 parcialmente sustituido por plutonio procedente del reprocesamiento de combustible gastado, y el nuevo enriquecimiento de colas de uranio empobrecido. Al ritmo de consumo estimado de 2013, la duración de las 5,9 Mt de uranio que representan el total estimado de los recursos económicamente viables a los precios actuales del mercado sería de 84 años.

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación del combustible

42. Seis países (el Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido) tienen en funcionamiento plantas a escala comercial de conversión de octóxido de triuranio (U_3O_8) en hexafluoruro de uranio (UF_6), y en la Argentina, el Brasil, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán operan instalaciones de conversión en pequeña escala. Los Estados Unidos utilizan un proceso en seco de volatilización de fluoruros, mientras que todos los demás países que realizan actividades de conversión emplean un proceso en húmedo. La capacidad de conversión mundial total se ha mantenido constante, en unas 76 000 t de U en forma

de UF₆ por año. La demanda actual total de servicios de conversión (suponiendo una concentración de uranio 235 en las colas⁵ del 0,25 %) se sitúa entre 60 000 y 64 000 toneladas por año.

43. AREVA, de Francia, está sustituyendo su capacidad de conversión del uranio en COMURHEX I, que está previsto poner en régimen de parada en 2015, por el nuevo proyecto COMURHEX II, con instalaciones en Malvési y Pierrelatte. Para mejorar su capacidad de conversión, la compañía de combustible TVEL de la Federación de Rusia tiene previsto comenzar a construir un nuevo centro en el Grupo Siberiano de Empresas Químicas en 2015, con la puesta en servicio de la primera etapa en 2018 y de la segunda etapa en 2020.

44. La capacidad mundial total de enriquecimiento es actualmente de unos 65 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 49 millones de UTS anuales. Cinco empresas ofrecen servicios comerciales de enriquecimiento: CNNC (China), AREVA (Francia), la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” (Federación de Rusia), USEC (Estados Unidos de América) y URENCO (Europa y Estados Unidos de América). También hay pequeñas instalaciones de enriquecimiento en la Argentina, el Brasil, la India, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán. La Argentina está reconstruyendo su capacidad de difusión gaseosa en Pilcaniyeu.

45. La segunda etapa de la planta de enriquecimiento de uranio de URENCO USA en Nuevo México entró en pleno funcionamiento en 2014, con una capacidad de 3,7 millones de UTS, sumándose a la primera etapa de las operaciones, que había comenzado en junio de 2010 y había alcanzado su plena capacidad, de 1,6 millones de UTS, en 2012. Ya se está construyendo la Etapa III, que cuando esté terminada, en 2022, elevará la capacidad total de la planta a 5,7 millones de UTS aproximadamente.

46. URENCO USA es la única planta de enriquecimiento de uranio en funcionamiento en los Estados Unidos de América. Hay planes de construir otras tres. AREVA está planificando construir una planta centrifugadora de 3,3 millones de UTS en Eagle Rock, en Idaho. Global Laser Enrichment está proyectando la construcción de una planta de enriquecimiento por láser de 6 millones de UTS en Wilmington, en Carolina del Norte. Ambas plantas deberían comenzar a funcionar antes de 2020. La Planta de Centrifugación Estadounidense (ACP) de la USEC, cuya actividad se suspendió en 2009, iniciará un nuevo programa de I+D, el Programa de Operaciones y Demostración de la Tecnología de Centrifugación Estadounidense, que se ejecutará hasta el final de 2015. El propósito es mantener la tecnología del Proyecto de Centrifugación Estadounidense y subsanar algunas deficiencias técnicas que aparecieron en 2014 en las centrifugadoras de la ACP.

47. La planta de enriquecimiento de Resende, explotada por las Industrias Nucleares del Brasil (INB), proporcionará el 80 % del uranio enriquecido que se necesitará en 2015 para la recarga de combustible de la central nuclear Angra-1. INB tiene previsto elevar gradualmente este porcentaje hasta el 100 %. Se está llevando a cabo un estudio sobre la cobertura de las necesidades de enriquecimiento de todos los reactores nucleares del Brasil.

48. La desconversión⁶ del UF₆ empobrecido en óxido de uranio o UF₄ permite almacenar el uranio empobrecido a largo plazo en una forma más estable. En 2014, la capacidad total mundial de desconversión se mantuvo en unas 60 000 t de UF₆ anuales. Actualmente, las principales instalaciones

⁵ La concentración de uranio 235 en las colas, o en la fracción empobrecida, determina indirectamente la cantidad de trabajo que se debe efectuar en una determinada cuantía de uranio para obtener una concentración dada en el producto. Un aumento de la concentración de las colas asociado con una cantidad fija y una concentración dada en el uranio enriquecido reduce el enriquecimiento requerido, pero incrementa las necesidades de uranio natural y de conversión, y viceversa. Las concentraciones de las colas pueden variar ampliamente, y alterarán la demanda de servicios de enriquecimiento.

⁶ Para fabricar combustible de uranio enriquecido, el UF₆ enriquecido ha de reconvertirse en polvo de UO₂. Esta es la primera etapa de la fabricación de combustible enriquecido, y se denomina reconversión o desconversión.

en funcionamiento son la planta de AREVA en Tricastin (Francia), dos plantas de Uranium Disposition Services en Portsmouth y Paducah (Estados Unidos de América), y la planta de desconversión W-ECP de la Planta Electroquímica de Zelenogorsk en Siberia (Federación de Rusia). En los Estados Unidos se está construyendo una planta en Nuevo México, a cargo de International Isotopes. URENCO ChemPlants, del Reino Unido, recibió la aprobación reglamentaria y el permiso de construcción para una instalación de gestión de colas en 2010 y espera iniciar las operaciones en 2016. La instalación procesará las existencias europeas de subproductos de uranio empobrecido de URENCO y comprenderá una planta de desconversión de UF_6 y varias instalaciones de almacenamiento, mantenimiento y procesamiento de residuos.

49. La demanda anual de servicios de fabricación de combustible para reactores de agua ligera (LWR) se mantuvo en unas 7000 toneladas de uranio enriquecido en conjuntos combustibles, pero se prevé que en 2015 aumentará a unas 8000 t de U anuales. Las necesidades para los PHWR ascendieron a 3000 t de U anuales. Ahora hay varios suministradores que compiten por la mayoría de los tipos de combustible. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 500 t de U anuales (uranio enriquecido) para los LWR y en unas 4000 t de U anuales (uranio natural) para los PHWR. En el caso del combustible de uranio natural para los PHWR, el uranio se purifica y se convierte en dióxido de uranio (UO_2) en la Argentina, el Canadá, China, la India y Rumania.

50. Tras recibir la aprobación reglamentaria, la Unidad 1 de la central nuclear Tianwan de China, un reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (WWER), ha comenzado a utilizar el nuevo combustible TVS-2M de la compañía de combustible TVEL, que puede permanecer en el núcleo por un período más prolongado, de 18 meses. Este tipo de combustible ya se utiliza en las centrales nucleares de Balakovo y Rostov de la Federación de Rusia. Tianwan 2 también se pasará al uso de este combustible. El combustible TVS-2M para las Unidades 3 y 4 de Tianwan, que aún están en construcción, se fabricará en la planta de Yibin de China.

51. Westinghouse, en los Estados Unidos de América, está desarrollando sensores de neutrones termoacústicos que se colocarán dentro de los conjuntos combustibles para monitorizar la distribución de la potencia y la temperatura en el núcleo. Estos sensores pueden ayudar a los operadores de las centrales a monitorizar el núcleo con mucha más exactitud, permitiendo un uso más eficiente del combustible, y pueden también vigilar los defectos y los problemas de seguridad en las barras de combustible. El prototipo de este dispositivo se ensayará en 2015, y su uso comercial más amplio debería comenzar en 2019.

52. En el Japón, Toshiba e IBIDEN han desarrollado una nueva tecnología para la fabricación de componentes del combustible nuclear a partir de carburo de silicio, con vistas a obtener un combustible a prueba de accidentes, entre otras cosas, para reemplazar las vainas de zircaloy en los reactores de agua ligera. Se ha desarrollado un prototipo de cubierta del conjunto combustible, y en 2016 comenzarán las pruebas en un reactor de investigación.

53. Las operaciones de reciclado proporcionan una fuente secundaria de combustible nuclear, consistente en uranio reprocesado y combustible de MOX. Actualmente, Elektrostal (Federación de Rusia) produce unas 100 t anuales de uranio reprocesado para AREVA. Una línea de producción de la planta de AREVA en Romans (Francia) convierte anualmente alrededor de 80 toneladas de metal pesado de uranio reprocesado en combustible para los LWR de Francia. La capacidad mundial de fabricación de combustible de MOX es actualmente de unas 250 toneladas de metal pesado; la instalación principal se encuentra en Francia y algunas más pequeñas en la India, el Japón y la Federación de Rusia.

54. La Federación de Rusia y la India fabrican combustible de MOX para reactores rápidos. En la Federación de Rusia se está construyendo una fábrica de combustible de MOX para el reactor rápido BN-800 en Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26), y también hay instalaciones piloto en

Dimitrovgrad, en el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos (NIIAR), y en Ozersk, en la planta Mayak. La fábrica de combustible de MOX del NIIAR se ha modernizado recientemente y produce combustible de MOX compactado por vibración. Se ha producido el primer lote de 56 conjuntos combustibles de MOX para el reactor rápido BN-800 Beloyarsk 4, que alcanzó la criticidad este año. El Instituto de Investigación y Diseño para la Tecnología de Construcción Nuclear (NIKIMT) de Atomstroy ha desarrollado y fabricado un sistema de soldadura accionado a distancia para la producción de conjuntos combustibles de MOX. El nuevo sistema se utilizará en la fábrica de combustible de MOX de Zheleznogorsk.

55. Ha comenzado la construcción de una planta piloto de producción de combustible para el reactor rápido experimental BREST-300 que se construirá en el Grupo Siberiano de Empresas Químicas en la Federación de Rusia. Han concluido también las pruebas del conjunto combustible TVS-5 con combustible mixto de nitruros de uranio y plutonio (figura A-7). La construcción del BREST-300 comenzará en 2016, y se espera que esté terminada en 2020. El BREST-300 es un reactor refrigerado por plomo desarrollado por el Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (NIKIET).



Fig. A-7. Conjunto combustible TVS-5, el prototipo de combustible para el reactor avanzado BREST-300. (Fotografía: Grupo Siberiano de Empresas Químicas).

56. En los Estados Unidos de América, la licencia de construcción para la fábrica de combustible de MOX parcialmente construida en el emplazamiento del río Savannah, en Carolina del Sur, ha sido prorrogada por 10 años y los fondos para continuar la construcción fueron aprobados por el Congreso de los Estados Unidos.

Garantía de suministro

57. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA en Kazajstán. Desde entonces, la Secretaría del Organismo se ha ocupado de las disposiciones financieras, jurídicas y técnicas para el establecimiento del banco. Ello ha incluido una evaluación técnica completa de la instalación propuesta para el Banco de UPE del OIEA. En 2014 se evaluaron las repercusiones programáticas de la seguridad sísmica en el proyecto global del Banco de UPE del OIEA, para determinar si la falla geológica que pasa muy cerca del emplazamiento propuesto para el Banco podría plantear problemas de seguridad. Esta evaluación del riesgo programático (PRA), examinada independientemente por una empresa consultora internacional de ingeniería sísmica, permitió concluir que la seguridad sísmica del Banco de UPE del OIEA se podría garantizar aplicando medidas de ingeniería apropiadas, incluso en el escenario del suceso sísmico extremo postulado en la PRA. Sobre la base del resultado de la PRA, el Organismo y Kazajstán concluyeron, con un grado suficiente de confianza, que se podía establecer el Banco de UPE

del OIEA en el emplazamiento de la Planta Metalúrgica de Ulba (UMZ). Una reserva de UPE creada en Angarsk tras el acuerdo de febrero de 2011 entre el Gobierno de la Federación de Rusia y el Organismo se mantuvo operativa.⁷

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible nuclear

58. Para la gestión del combustible gastado de los reactores de potencia se aplican dos estrategias diferentes. En una de ellas, el combustible gastado se almacena y posteriormente se reprocesa para extraer el material utilizable (uranio y plutonio) en la fabricación de combustible nuevo, y en la otra, el combustible gastado se almacena en espera de su disposición final en un repositorio geológico profundo. El reciclado mediante reprocesamiento permite reducir la cantidad (el volumen) de desechos de actividad alta que deban ser sometidos, con el tiempo, a disposición final, y maximizar la utilización de materiales fisibles para la producción de energía. Actualmente, países como China, la Federación de Rusia, Francia, la India y el Reino Unido reprocesan el combustible gastado, mientras que otros, como Finlandia y Suecia, han optado por la disposición final del combustible gastado en una comunidad que se presta voluntariamente a ello. La mayoría de los países no han decidido aún qué estrategia adoptar, y por ahora almacenan el combustible gastado y se mantienen al corriente de las novedades relacionadas con ambas opciones.

59. La Directiva 2011/70/Euratom del Consejo de la Unión Europea (UE) obliga jurídicamente a los Estados Miembros de la UE a establecer y mantener una política para la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos. Indica las reglas que debe seguir cada uno de los Estados Miembros de la UE en lo que atañe al marco nacional, la autoridad reguladora competente, los titulares de licencias, los conocimientos especializados y las aptitudes, los recursos financieros, la transparencia y la presentación de informes, entre otras cosas. Cada Estado Miembro de la UE tendrá la responsabilidad última de gestionar el combustible gastado y los desechos radiactivos que en él se generen. En 2014, el Consejo Consultivo de Ciencias de las Academias Europeas (EASAC) publicó un informe titulado *Management of spent nuclear fuel and its waste* para informar a los responsables de la formulación de políticas sobre las cuestiones importantes que debían tomarse en consideración al elaborar los programas nacionales correspondientes. En el informe se concluye que la política del ciclo del combustible debería tener en cuenta: i) los períodos largos (más de 100 años) de todos los ciclos del combustible, que hacen que sea ventajoso generar soluciones técnicas robustas, que abarquen todo el proceso, pero manteniendo abiertas las otras opciones para dar cabida a los cambios en las políticas y los planes futuros; ii) la flexibilidad necesaria para las decisiones futuras; iii) las mejoras que podrían derivarse del reciclado en los reactores de neutrones rápidos; iv) las soluciones nacionales o regionales para la disposición final geológica profunda; y v) la formación y capacitación necesarias para apoyar la gestión segura a largo plazo del combustible nuclear gastado.

60. La Oficina de Energía Nuclear del DOE de los Estados Unidos publicó en 2014 el informe final de un estudio de la evaluación y el escrutinio técnico del ciclo del combustible nuclear. En este estudio trienal se definió un “marco” (una estructura lógica y un proceso que incluye conjuntos de datos, métodos e instrumentos) para respaldar la adopción de decisiones en la I+D sobre el ciclo del combustible nuclear. Se describieron las cuatro opciones más prometedoras - todas ellas son ciclos del combustible de reciclado continuo que utilizan reactores rápidos con combustible a base de uranio - y la labor de I+D necesaria para ellas, así como otros 14 ciclos del combustible posiblemente prometedores que podrían mejorar el comportamiento.

⁷ En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2012* se describen otros mecanismos de garantía de suministro actualmente en vigor.

61. Los Estados Unidos de América aprobaron en 2014 una nueva normativa sobre el almacenamiento prolongado del combustible nuclear gastado, en virtud de la cual este combustible puede almacenarse en forma segura en piscinas y cascos secos por un tiempo mayor que la vida útil autorizada del reactor, hasta que se coloque definitivamente en un repositorio geológico profundo. La nueva normativa, y la correspondiente Declaración genérica del impacto ambiental del almacenamiento prolongado del combustible nuclear gastado, sustituyen la decisión sobre la seguridad de los desechos y la norma del almacenamiento temporal de 2010. La Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos volverá a tramitar licencias para nuevos reactores y renovaciones de licencias para reactores antiguos, después de dos años de suspensión de esta actividad en espera de la nueva reglamentación.

62. En la República de Corea, un panel de expertos independiente presentó un informe a la Comisión sobre Participación Pública en la Gestión del Combustible Nuclear Gastado (PECOS) en que se recomendaban investigaciones sobre diversos métodos de gestión del combustible nuclear gastado a medio y largo plazo, comprendidos la disposición final permanente, el reciclado, el reprocesamiento y el almacenamiento. El panel recomendó también que se construyeran nuevas instalaciones de almacenamiento provisional del combustible gastado, utilizando el almacenamiento en seco cuando fuera oportuno. PECOS es un órgano consultor provisional establecido en 2013 para obtener el asesoramiento de expertos sobre varias ideas para gestionar el combustible gastado y se prevé que en junio de 2015 presentará al Gobierno sus recomendaciones de política.

63. En 2014 se descargaron, como combustible gastado de todas las centrales nucleares, aproximadamente 10 000 t de metal pesado. La cantidad total acumulada de combustible gastado que se ha descargado en todo el mundo se cifra en unas 380 500 t de metal pesado, de las cuales alrededor de 258 700 t están almacenadas en instalaciones situadas ya sea dentro o fuera del emplazamiento del reactor. Menos de un tercio de la cantidad acumulada de combustible gastado descargado en todo el mundo ha sido ya reprocesada. En 2014, la capacidad de diseño mundial para el reprocesamiento comercial, repartida en cinco países (la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido), era de unas 4800 t de metal pesado anuales. Sin embargo, no toda esa capacidad está operativa.

64. En 2014, la planta de reprocesamiento Magnox de Sellafield (Reino Unido) celebró sus 50 años de funcionamiento. Hasta ahora la planta ha reprocesado más de 50 000 t de uranio, lo mismo que todas las demás plantas juntas. Se prevé que esta planta finalizará sus operaciones en 2017 (figura A-8).



Fig. A-8. La planta de reprocesamiento Magnox, en Sellafield, cumplió 50 años de funcionamiento. (Fotografía: Sellafield Ltd).

65. La planta de reprocesamiento de Rokkasho, en el Japón, que debía estar terminada en 2014, se retrasará hasta 2016 para cumplir con los requisitos reglamentarios nacionales.

66. La instalación de almacenamiento centralizado en seco de combustible gastado en Zheleznogorsk (Federación de Rusia), que comenzó a funcionar en 2012, está ahora en fase de ampliación. En total, habrá tres edificios con una capacidad de aproximadamente 30 000 t de uranio para el combustible gastado de los reactores de alta potencia tipo canal (RBMK) y los WWER. La segunda etapa para el almacenamiento del combustible gastado de los WWER se pondrá en servicio en 2015. Se prevé que la planta de reprocesamiento RT-2 comenzará a funcionar en 2021, para reprocesar el combustible de los WWER-1000.

67. En 2014, la CNNC de China y Candu Energy del Canadá firmaron un acuerdo marco para la constitución de una empresa conjunta destinada a construir los reactores CANDU de combustible avanzado (AFCR). El AFCR se diseñará de modo que utilice torio o uranio reciclado como combustible, lo que reducirá las existencias de combustible gastado y rebajará considerablemente las necesidades de uranio sin irradiar. El combustible gastado de cuatro PWR convencionales puede abastecer plenamente un AFCR (además de proporcionar plutonio reciclado para el combustible de MOX).

68. Ucrania comenzó la construcción de una instalación central de almacenamiento de combustible gastado, que permitirá almacenar fuera de los emplazamientos de los reactores el combustible gastado producido por los WWER-1000 y WWER-440 de las centrales de Ucrania del Sur, Rovno y Khmelnytskyi. La instalación se construirá entre las aldeas evacuadas de Stara Krasnytsya, Buryakivka, Chystohalivka y Stechanka, dentro de la Zona de Exclusión de Chernóbil, y facilitará la rehabilitación ecológica de la Zona de Exclusión y la reanudación de las actividades económicas en algunas tierras de esta zona. La instalación debería entrar en funcionamiento en 2017 a más tardar.

69. La retirada de los 1331 conjuntos combustibles gastados almacenados en la piscina de la Unidad 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi concluyó el 5 de noviembre de 2014. El combustible gastado se ha trasladado a la piscina común del emplazamiento, desde la cual los conjuntos más antiguos pasan al almacenamiento en seco en cascos metálicos en el mismo emplazamiento.

A.3.4. Clausura, restauración y gestión de los desechos radiactivos

70. El uso de tecnologías nucleares de cualquier tipo - para la producción de energía, para actividades de investigación o para aplicaciones médicas e industriales - comporta la obligación de gestionar en forma segura los desechos radiactivos producidos, y de planificar las actividades futuras de clausura y restauración ambiental. Para planificar adecuadamente las instalaciones y actividades de gestión de desechos que se requerirán, es de la máxima importancia conocer la situación actual de las existencias de desechos radiactivos, es decir, los volúmenes, los lugares en que se encuentran y sus condiciones y propiedades, así como las tendencias futuras de la generación de ese tipo de desechos. La gestión segura de los desechos radiactivos requiere una adecuada gestión de las corrientes de desechos, su tratamiento y su acondicionamiento, así como una capacidad de almacenamiento adecuada, un sistema de transporte entre las instalaciones y, a la larga, una opción de disposición final.

71. En el Foro Científico celebrado durante la quincuagésima octava reunión de la Conferencia General del Organismo, se insistió en la necesidad de un enfoque amplio e integrado, de principio a fin, de la gestión de los desechos radiactivos, y se destacó que ya existían soluciones que se podían aplicar (figura A-9).



Fig. A-9. Prácticamente todos los Estados Miembros tienen que gestionar alguna forma de desecho radiactivo. Naranja: Estados Miembros cuyas existencias se derivan predominantemente de la producción de energía nucleoelectrónica. Azul: Estados Miembros cuyas existencias se derivan predominantemente de reactores de investigación. Verde: Estados Miembros cuyas existencias consisten predominantemente en fuentes radiactivas selladas en desuso.

Estimaciones de las existencias mundiales de desechos radiactivos

72. Las estimaciones de las existencias mundiales de desechos radiactivos se basan en la información facilitada voluntariamente por los Estados Miembros a la Base de Datos sobre Gestión de Desechos en Internet (NEWMDB) del OIEA (cuadro A-2). El Organismo ha puesto en marcha un proyecto sobre la situación y las tendencias, en cooperación con la Comisión Europea y la AEN de la OCDE, para elaborar un procedimiento simplificado y exacto de presentación de informes nacionales que puedan utilizar todos los Estados Miembros para cumplir sus obligaciones a ese respecto. En consonancia con ello, se está mejorando la NEWMDB para poder hacer estimaciones más exactas de las existencias mundiales.

73. Al mes de diciembre de 2014 había en el mundo, para la gestión de esas existencias de desechos, 467 instalaciones de almacenamiento y 154 instalaciones de disposición final activas, suspendidas o cerradas⁸.

Cuadro A-2. Estimación de las existencias mundiales de desechos radiactivos en 2014⁹.

Clase de desechos	Almacenamiento ¹⁰ [metros cúbicos]	Disposición final acumulada [metros cúbicos]
Desechos de actividad muy baja (VLLW)	173 000	273 000
Desechos de actividad baja (LLW)	56 703 000	65 192 000
Desechos de actividad intermedia (ILW)	8 745 000	10 589 000
Desechos de actividad alta (HLW)	2 745 000	72 000

Fuente: NEWMDB (2013), informes nacionales oficiales, y datos a disposición del público.

⁸ Según la información facilitada por los Estados Miembros a la NEWMDB, que puede consultarse en línea en la dirección <http://newmdb.iaea.org/>.

⁹ Las cifras del cuadro A-2 son estimaciones y no un recuento exacto de las cantidades de desechos radiactivos que actualmente se gestionan en el mundo. Las actualizaciones recientes se basan en los informes anteriores sobre las existencias y en la producción de desechos prevista anualmente. Hay también diferencias intrínsecas en las estimaciones de las cantidades almacenadas de año en año, debido a: a) los cambios de masa y volumen que se producen durante el proceso de gestión de los desechos; b) los cambios en la presentación de la información, y las modificaciones o correcciones hechas por los Estados Miembros a sus propios datos; y c) la adición de nuevos Estados Miembros a la base de datos.

¹⁰ Normalmente los desechos se someten a tratamiento y acondicionamiento y pasan por diversas fases de manipulación durante su almacenamiento y antes de su disposición final. Por lo tanto, la masa y el volumen de desechos radiactivos cambian continuamente durante el proceso de gestión previa a la disposición final. Esto puede dar lugar a discrepancias en las estimaciones de las cantidades almacenadas de año en año.

Clausura

74. Al 31 de octubre de 2014 había 438 centrales nucleares en explotación en el mundo, y otras 149 estaban en régimen de parada o en fase de clausura, con 17 de ellas ya completamente clausuradas. Había también un gran número de instalaciones del ciclo del combustible: más de 300 en funcionamiento, alrededor de 170 paradas o en fase de clausura y 125 completamente clausuradas. En cuanto a los reactores de investigación, 247 estaban en explotación, más de 180 estaban en régimen de parada o en fase de clausura, y más de 300 reactores de investigación y conjuntos críticos habían sido ya completamente clausurados.

75. Desde el comienzo de este siglo se ha adquirido una experiencia considerable en el proceso de clausura, con un avance importante sobre todo en los países con programas de energía nucleoelectrónica de larga data, especialmente Alemania, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido. Como ejemplos de programas que hicieron progresos sustanciales en la clausura en 2014 cabe mencionar el avance continuo en el desmantelamiento de las centrales nucleares de la primera generación en Francia; el avance continuo en la segmentación y el acondicionamiento de los desechos de un reactor de la central nuclear José Cabrera de España; la eliminación de las galerías de filtros de la chimenea de la Pila 1 de Windscale en el Reino Unido, que se contaminó durante el incendio de la pila en 1957 (figura A-10); y los tres programas activos de clausura de centrales nucleares en los Estados Unidos. Se están ejecutando proyectos similares también en Bulgaria, Eslovaquia y Lituania, donde hay centrales nucleares que se pusieron en régimen de parada antes del final de su vida de diseño.

76. Dado que muchas de las instalaciones nucleares que se están explotando actualmente fueron puestas en servicio en los años setenta y ochenta y llegarán al término de su vida de diseño en los próximos veinte años, se prevé que en los decenios venideros habrá una cantidad considerable de actividades de clausura.

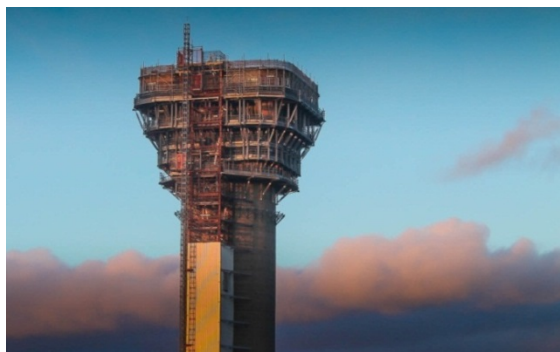


Fig. A-10. Retirada del servicio de las galerías de filtros de la chimenea de la Pila 1 de Windscale. (Fotografía: Sellafield Ltd).

77. Las actividades destinadas a clausurar centrales nucleares puestas en régimen de parada después de un accidente nuclear representan un reto para varios países, como el Japón (Fukushima Daiichi - véase el recuadro) y Ucrania (Chernóbil). En la central nuclear de Chernóbil se hicieron progresos considerables en la construcción de un nuevo confinamiento seguro. Este nuevo confinamiento, que cubrirá la Unidad 4 dañada, debería estar plenamente instalado en 2015, con el objetivo principal de impedir la emisión de material radiactivo al medio ambiente y posibilitar la demolición parcial de las estructuras viejas en el futuro.

Restauración

78. Algunos países están avanzando en la tarea de restaurar las tierras afectadas por las prácticas y accidentes del pasado y, en consecuencia, han acumulado competencias y recursos técnicos adecuados. Sin embargo, muchos programas nacionales aún tropiezan con dificultades importantes

para la ejecución de programas de restauración. Se ha ultimado el informe de referencia del Proyecto sobre Limitaciones en la Ejecución de Programas de Clausura y Restauración Ambiental (CIDER), iniciado en 2013 para ayudar a superar esas limitaciones. Los obstáculos detectados se clasificaron en cuatro categorías principales: i) el marco normativo, jurídico y de reglamentación nacional; ii) las limitaciones financieras, incluidos los aspectos logísticos, los recursos y la gestión de los fondos disponibles; iii) los impedimentos tecnológicos e infraestructurales; iv) las cuestiones que afectan a los interesados y que es preciso abordar y destacar durante todo el ciclo de la planificación y ejecución de los proyectos de clausura y restauración ambiental. Para superar algunos de estos obstáculos, el informe de referencia indica asimismo algunas estrategias, que pueden potenciarse con una mayor colaboración entre los programas. Pero también se necesitarán nuevas soluciones innovadoras.

79. Un logro importante ha sido el desarrollo de la Unidad Móvil de Caracterización de Emplazamientos. Este concepto de laboratorio móvil proporciona un medio interactivo para realizar caracterizaciones rápidas y eficaces de los emplazamientos, con la determinación inmediata, en tiempo real, de las áreas de gran interés. Esta unidad puede ser un recurso útil para los Estados Miembros que no tienen una infraestructura de laboratorios analíticos adecuada. También puede ayudar a aquellos que tienen laboratorios de análisis, pero tropiezan con retos grandes e imprevistos para la caracterización. El suministro de esta unidad a los Estados Miembros es una forma eficaz de apoyar la caracterización de los emplazamientos contaminados, que es un paso crucial en la ejecución de proyectos de restauración.

Actividades para hacer frente a las consecuencias del accidente de Fukushima Daiichi: gestión de los desechos radiactivos, clausura y restauración

El accidente de Fukushima Daiichi creó importantes retos relacionados con la clausura, la restauración y la gestión de los desechos radiactivos, tanto dentro del emplazamiento de la central nuclear como en una vasta área circundante. Mediante la cooperación con la comunidad internacional y el asesoramiento obtenido de misiones de examen internacionales realizadas bajo los auspicios del Organismo, el Japón ha hecho progresos considerables en estas esferas.

La gestión del combustible nuevo restante y del combustible gastado es una de las actividades más importantes para la clausura de la central nuclear. Una tarea sustancial que se llevó a cabo durante el año fue el traslado del combustible irradiado y sin irradiar de la piscina de la Unidad 4 a la piscina común del emplazamiento.

Se siguió avanzando en el despliegue de tecnologías de tratamiento de desechos líquidos para eliminar los radionucleidos contaminantes de las casi 400 000 toneladas de agua radiactiva recogidas en la instalación. El cesio se elimina actualmente utilizando dos sistemas diferentes de intercambio iónico, y la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO) ha puesto en servicio recientemente un sistema de eliminación del estroncio configurado como una unidad móvil y transportable que se puede instalar directamente en los lugares en que se generan o almacenan los desechos. También se han introducido mejoras en el funcionamiento del Sistema de Eliminación de Múltiples Radionucleidos, para retirar el estroncio y otros radionucleidos restantes tras la eliminación del cesio. Aumentando la capacidad actual de 750 m³/d a 2000 m³/d, la TEPCO espera acelerar la descontaminación del agua contaminada que se acumula continuamente. Este año, el Instituto de Investigaciones Mitsubishi ha recibido el encargo de explorar las nuevas tecnologías in situ avanzadas para filtrar el cesio y el estroncio del agua de mar del puerto.

Actividades para hacer frente a las consecuencias del accidente de Fukushima Daiichi: gestión de los desechos radiactivos, clausura y restauración (cont.)

Los trabajos de restauración han avanzado satisfactoriamente. Asimismo, ha habido una buena coordinación entre las actividades de restauración y los esfuerzos de reconstrucción y revitalización. Las enseñanzas extraídas de la labor de restauración se están acumulando y es de vital importancia que se den a conocer a la comunidad internacional. Entre ellas cabe mencionar el fomento de la protección de la población contra las radiaciones, centrándose en las tasas de dosis individual; el fortalecimiento de la comunicación de los riesgos mediante la transmisión de mensajes claros y la información sobre los nuevos hallazgos relativos a los efectos de la descontaminación; el aumento de la eficiencia y eficacia de las actividades de descontaminación; y la mejora de las políticas integrales para proteger a las personas contra los efectos indeseados de la radiación ionizante y, al mismo tiempo, calmar la ansiedad de la población y restablecer la sensación de seguridad.

El gobierno de la Prefectura de Fukushima convino en establecer una instalación de almacenamiento provisional en un emplazamiento cercano al de Fukushima Daiichi. Ello permitirá trasladar y reunir en un solo lugar los desechos radiactivos y el suelo contaminado de cerca de 1000 emplazamientos de almacenamiento temporal.

Desechos radiactivos históricos

80. El Grupo de Contacto de Expertos para Iniciativas Internacionales sobre el Legado Nuclear en la Federación de Rusia (CEG) del Organismo contribuyó a la ejecución de programas internacionales en esta esfera. Hasta la fecha, la Federación de Rusia y sus asociados internacionales han procedido a la retirada del combustible y el desmantelamiento de 197 submarinos nucleares clausurados. Los reactores de los submarinos de los que se ha descargado el combustible están siendo precintados y 76 se encuentran en instalaciones de almacenamiento a largo plazo en el noroeste y el lejano oriente del país. En diciembre de 2014 concluyó la construcción de un centro regional de acondicionamiento y almacenamiento de todos los desechos radiactivos históricos en la región noroccidental, que contó con la asistencia de Alemania (figura A-11). Se han desarrollado tecnologías para la retirada segura del combustible de los núcleos de reactores con refrigerante de metal líquido y su posterior almacenamiento. En Mayak se puso en servicio, con la asistencia de Francia, una celda caliente para el tratamiento de los contenedores defectuosos de combustible nuclear gastado. Los esfuerzos internacionales conjuntos para clausurar los potentes generadores termoeléctricos de radioisótopos que se utilizaban en los faros a lo largo de la costa de la Federación de Rusia están llegando a su fin. En un examen de diciembre de 2014 del OIEA y el Presidente del CEG se prevé que las actividades del CEG concluirán en el verano de 2015.



Fig. A-11. El Centro Regional de Acondicionamiento de Desechos Radiactivos y Almacenamiento a Largo Plazo en la región noroccidental de la Federación de Rusia (a la izquierda) y el lugar de almacenamiento de reactores (a la derecha). (Fotografía: Energiewerke Nord GmbH).

Tratamiento y acondicionamiento de los desechos radiactivos

81. Una vez generados, los desechos radiactivos deben someterse a un proceso para reducir su volumen, y convertirse en una forma que sea aceptable para el almacenamiento y la disposición final en condiciones de seguridad y que permita su manipulación y transporte.

82. Hay tecnologías bien establecidas para el tratamiento de desechos sólidos, líquidos y gaseosos, que se aplican en muchos Estados Miembros. En el emplazamiento del Laboratorio Nacional de Idaho (INL) del DOE de los Estados Unidos se está poniendo en marcha una novedosa tecnología de reformado con vapor en lecho fluidizado para tratar aproximadamente 3 300 000 litros de desechos líquidos muy radiactivos procedentes del reprocesamiento de combustible de UME. Se está difundiendo la utilización del tratamiento por plasma para los desechos sólidos, que tiene un elevado factor de reducción de volumen, y en la central nuclear de Kozloduy, en Bulgaria, está ahora en construcción una instalación de tratamiento por plasma.

83. El acondicionamiento de los desechos comprende la inmovilización de los radionucleidos, la colocación de los desechos en contenedores y el embalaje suplementario. Las matrices de geopolímeros siguen dando resultados prometedores para la inmovilización de las corrientes de desechos difíciles, como las resinas orgánicas de intercambio iónico gastadas en la planta de tratamiento de desechos de Bohunice en Eslovaquia. Los desechos radiactivos de actividad alta tienen que convertirse en formas muy duraderas, por lo que se suelen vitrificar. Sin embargo, para producir la forma del desecho adecuada para la disposición final de los 4400 m³ de calcinado de alta actividad actualmente almacenados en el emplazamiento del INL se recomienda otra técnica de acondicionamiento, el prensado isostático en caliente. En Australia se está planificando la construcción de una instalación para tratar los desechos generados en el pasado, el presente y el futuro en la fabricación de molibdeno 99 y de otros isótopos utilizados en aplicaciones médicas. Esta planta calcinará los líquidos e inmovilizará los desechos radiactivos en un material sólido duradero de tipo roca (synroc) apto para el almacenamiento y la disposición final.

84. En cuanto a las instalaciones para desechos antiguos, se han hecho progresos notables en Sellafield (Reino Unido), con el inicio del reembalaje del combustible encapsulado heredado que se encuentra en la Piscina de Almacenamiento de Combustible de las Pilas, la resuspensión del lodo radiactivo en la Piscina de Almacenamiento de Combustible de la Primera Generación de Magnox y la apertura del nuevo Almacén de Productos Encapsulados 3 para el almacenamiento de desechos de actividad intermedia.

Disposición final de los desechos radiactivos

85. En muchas partes del mundo hay instalaciones de disposición final en funcionamiento para todas las categorías de desechos radiactivos, salvo los de alta actividad y/o el combustible gastado. Entre esas instalaciones cabe citar las de disposición final en zanjas para VLLW (p. ej., en España, los Estados Unidos, Francia y Suecia) y para LLW en zonas áridas (p. ej., en la Argentina, los Estados Unidos de América, la India y Sudáfrica), las estructuras artificiales cercanas a la superficie para LLW (p. ej., en China, Eslovaquia, España, Francia, la India, el Japón, Polonia, el Reino Unido y la República Checa), las estructuras artificiales subsuperficiales para desechos de actividad baja e intermedia (LILW) (p. ej., en Finlandia y Suecia), las instalaciones de disposición final en pozos barrenados para LLW en los Estados Unidos, y las instalaciones de disposición final geológica para LILW (p. ej., en los Estados Unidos y Hungría). Las opciones para la disposición final de los desechos de materiales radiactivos naturales varían según los reglamentos nacionales y abarcan desde instalaciones de disposición final en zanjas hasta estructuras artificiales subsuperficiales (p. ej., en Noruega).

86. En Finlandia, Francia y Suecia se han adoptado medidas con vistas a conceder licencias para instalaciones de disposición final geológica de HLW y/o combustible gastado.

87. El Canadá está avanzando en los trabajos de desarrollo de dos repositorios geológicos profundos. Ontario Power Generation, la compañía nucleoelectrica más grande del Canadá, propone construir un repositorio geológico profundo para sus desechos de actividad baja e intermedia en el emplazamiento nuclear de Bruce en Kincardine, Ontario. Este proyecto actualmente está en proceso de un examen reglamentario federal. La Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares (NWMO), una organización que agrupa a las compañías nucleoelectricas del Canadá establecida con arreglo a la Ley sobre Desechos de Combustibles Nucleares de 2002, está trabajando con 11 comunidades interesadas a lo largo de un proceso de selección de emplazamiento para determinar una comunidad en buena disposición y con un emplazamiento seguro y adecuado para alojar un repositorio geológico profundo para la gestión a largo plazo de los desechos de combustible nuclear del país.

88. China tendrá necesidades de disposición final geológica de resultados del reprocesamiento de 140 000 toneladas de combustible gastado de una flota de 48 reactores. La disposición final se efectuará en una formación hospedante de roca cristalina o sedimentaria, y está previsto construir la primera instalación subterránea de investigación en la zona de Beishan. Los resultados que se espera obtener en esta instalación contribuirán a orientar las decisiones futuras sobre el uso de la disposición final geológica profunda.

89. La Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos (Andra) de Francia ha evaluado los resultados del proceso nacional formalizado de participación de las entidades públicas interesadas realizado en 2013, así como la retroinformación recibida de su órgano regulador. La Agencia tiene previsto presentar una solicitud de licencia en 2017, y aumentar la participación de los interesados en sus decisiones y, en particular, en su plan maestro de operaciones.

90. Para dar aplicación a su ley de junio de 2013 sobre la selección de un emplazamiento para un repositorio de disposición final de los desechos radioactivos que emiten calor, Alemania estableció en 2014 una nueva comisión. Sus recomendaciones, previstas para 2016, deberían incluir los criterios para la selección del emplazamiento y los requisitos relativos a la participación de los interesados.

91. El Gobierno del Reino Unido publicó en 2014 un Libro Blanco titulado *Implementing Geological Disposal*, en que se describe un marco para la gestión a largo plazo de los desechos radioactivos de actividad más alta. El Libro expone un enfoque para determinar los posibles emplazamientos de una instalación de disposición final geológica que se basa en el trabajo con las comunidades interesadas, y que comienza con dos años de actividades destinadas a dar solución a cuestiones importantes para los interesados.

92. En los Estados Unidos de América se comunicaron en 2014 varias novedades importantes en relación con la disposición final geológica. En su Evaluación de la Seguridad¹¹, la NRC concluyó, con un grado de confianza razonable, que el DOE había demostrado el cumplimiento de los requisitos reglamentarios de la NRC para la seguridad posterior al cierre.

93. La Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América reconoció el papel que podía desempeñar el concepto de la disposición final profunda en pozos barrenados en la disposición final segura y eficaz de los materiales nucleares. El concepto prevé la perforación de un pozo (o un conjunto de pozos) en la roca del basamento cristalino hasta una profundidad de alrededor de 5000 m bajo la superficie. El DOE de los Estados Unidos está proponiendo la realización de una demostración.

¹¹ *Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada: Repository Safety after Permanent Closure* (NUREG-1949, Volumen 3).

94. Además, las operaciones de la Planta Piloto de Aislamiento de Desechos (WIPP) del DOE de los Estados Unidos fueron sometidas a un escrutinio técnico por el órgano regulador, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), después de dos sucesos no relacionados entre sí (figura A-12). El primero, el incendio de un camión, no tuvo consecuencias radiológicas. La investigación reveló la falta de mantenimiento sistemático y de una adecuada cultura de la seguridad en las obras subsuperficiales, así como la necesidad de medidas correctoras relacionadas con la seguridad operacional. El segundo suceso parece haber sido causado por una mezcla incompatible de desechos y produjo una emisión radiactiva debida a una reacción exotérmica en un contenedor de desechos. La exposición resultante fue inferior al límite reglamentario establecido en la Ley de Aire Puro de la EPA. El DOE de los Estados Unidos publicó un plan de recuperación de la WIPP, con el fin de reanudar en cierta medida las operaciones de disposición final en el primer trimestre de 2016.

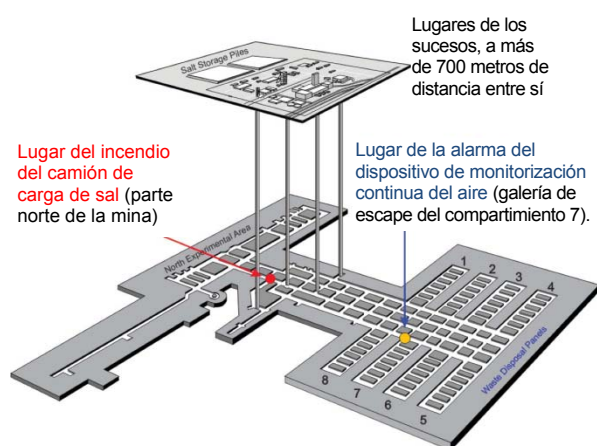


Fig. A-12. Lugares en que ocurrieron los dos sucesos de la WIPP en 2014. (Gráfico: WIPP, Departamento de Energía de los Estados Unidos).

Gestión de fuentes radiactivas selladas en desuso

95. Varios países, como Filipinas, Ghana, Malasia y Sudáfrica, están estudiando seriamente las opciones para la disposición final de las fuentes radiactivas selladas en desuso, entre ellas la disposición final conjunta con otros desechos en instalaciones apropiadas, las mayores opciones de reciclado y repatriación, o la disposición final en pozos barrenados con ese fin. Se ha elaborado una justificación genérica de la seguridad de la disposición final en pozos barrenados para las fuentes de las categorías 3 a 5, y ahora se está haciendo otro tanto para las fuentes de las categorías 1 y 2.

96. En 2014 se llevaron a cabo varias operaciones de retirada de fuentes radiactivas selladas en desuso de los locales de los usuarios para su control ya sea en una instalación nacional de almacenamiento de desechos radiactivos o en otra institución con condiciones de almacenamiento adecuadas. En Costa Rica se desplegó la celda caliente móvil para acondicionar y retirar cinco fuentes selladas en desuso de alta actividad con vistas a su reciclado. En Marruecos se consolidaron cinco fuentes selladas en desuso de alta actividad de las categorías 1 y 2, que se repatriaron a Francia. En varios Estados Miembros, entre ellos el Camerún y el Líbano, se inició el proceso para la repatriación de fuentes en desuso de las categorías 1 y 2 fabricadas en Francia, y las repatriaciones están programadas para el primer semestre de 2015.

97. Se han hecho considerables progresos en la vinculación de la celda caliente móvil a un concepto de diseño para la disposición final en pozos barrenados, con la intención de reducir al mínimo la manipulación de las fuentes y evitar el transporte innecesario.

98. En Fiji, Malasia y Montenegro finalizaron las operaciones relacionadas con el acondicionamiento de este tipo de fuentes y se impartió capacitación a personal local y regional.

99. El Organismo amplió el acceso al Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados, haciéndolo extensivo a muchas personas designadas por los países, para facilitar así la identificación de las fuentes radiactivas selladas en desuso encontradas sobre el terreno. En 2014 se dio inicio a la labor de añadir más detalles sobre las fuentes y los dispositivos, para aumentar la utilidad del catálogo.

A.4. Seguridad

100. En todo el mundo se siguieron adoptando medidas para mejorar la seguridad en las centrales nucleares. Ello incluyó la determinación y aplicación de las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi, la mejora de la eficacia de la defensa en profundidad, el fortalecimiento de la capacidad de preparación y respuesta para casos de emergencia, el mantenimiento y aumento de la creación de capacidad, y la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante. En la sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear, que se celebró en Viena del 24 de marzo al 4 de abril de 2014, también se examinaron las medidas puestas en práctica por los Estados Miembros a la luz del accidente.

101. El Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear siguió siendo la base de las medidas adoptadas por los Estados Miembros, la Secretaría y otras partes interesadas pertinentes para reforzar el marco de seguridad nuclear. El Organismo continuó compartiendo y difundiendo las enseñanzas extraídas del accidente mediante el análisis de los aspectos técnicos pertinentes. Organizó reuniones de expertos internacionales sobre la protección radiológica tras el accidente de Fukushima Daiichi (del 17 al 21 de febrero) y sobre la gestión de accidentes muy graves (del 17 al 20 de marzo). Además, celebró la Conferencia Internacional sobre los Desafíos que Afrontan las Organizaciones de Apoyo Técnico y Científico (TSO) para Mejorar la Seguridad Nuclear Tecnológica y Física (del 27 al 31 de octubre). En 2014 se publicaron los informes *IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*¹² e *IAEA Report on Radiation Protection after the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding*¹³.

102. La seguridad operacional de las centrales nucleares sigue siendo alta, como lo demuestran los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La figura A-13 muestra el número de paradas de emergencia o disparos manuales y automáticos no previstos registrados por cada 7000 horas (aproximadamente un año) de funcionamiento. Las paradas de emergencia son solo uno de los indicadores del comportamiento en lo que respecta a la seguridad, pero se utilizan comúnmente como indicación del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales, expresado en términos de la reducción del número de transitorios termohidráulicos y de reactividad no deseados y no previstos que requirieron una parada de emergencia del reactor. Como indica la figura, la mejora ha sido constante, con un ligero retroceso en 2013.

¹² <http://www.iaea.org/sites/default/files/humanfactors0914.pdf>.

¹³ <http://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf>.

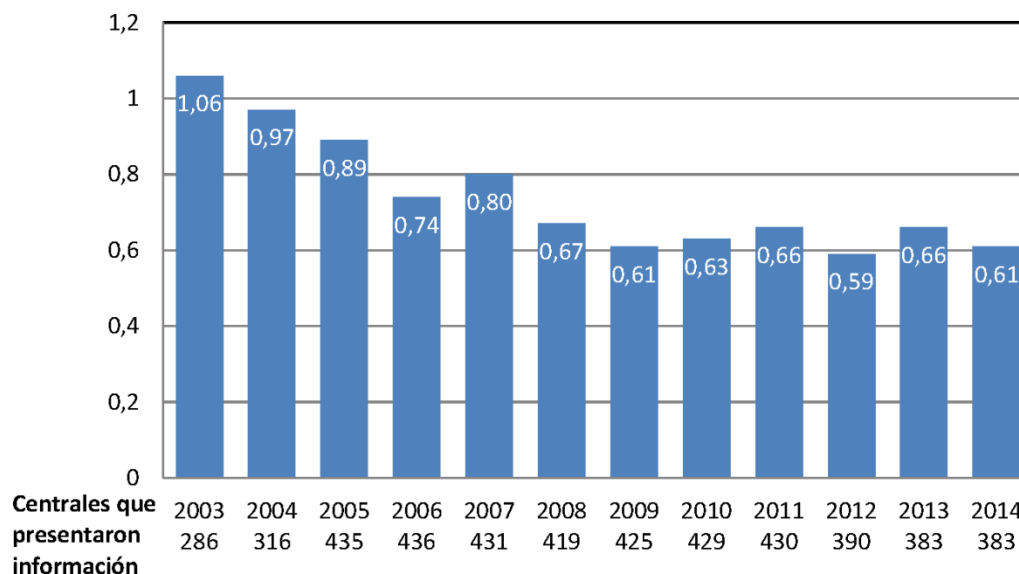


Fig. A-13. Tasa media de paradas de emergencia: promedio anual de paradas de emergencia automáticas y manuales. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia, <http://www.iaea.org/pris> del Organismo).

103. Puede obtenerse más información sobre seguridad nuclear en el *Examen de la Seguridad Nuclear de 2015*.

B. Datos atómicos y nucleares

104. Los archivos constantemente actualizados de los cuatro principales centros de datos nucleares del mundo son la base de toda la ciencia y la tecnología nucleares para aplicaciones tanto eléctricas como no eléctricas. Estos centros son la Sección de Datos Nucleares del OIEA, el Centro Nacional de Datos Nucleares del Laboratorio Nacional de Brookhaven de los Estados Unidos, el Banco de Datos de la AEN de la OCDE y el Centro de Datos Nucleares ruso de Obninsk. La Sección de Datos Nucleares coordina dos redes que conectan estos y otros centros especializados entre sí: la Red Internacional de Centros de Datos sobre Reacciones Nucleares, que se encarga principalmente de la base de Datos Experimentales sobre Reacciones Nucleares, y la Red Internacional de Evaluadores de Datos de Estructuras y Desintegración Nucleares, que supervisa el Archivo de Datos Evaluados de Estructuras Nucleares.

105. El Grupo de Trabajo sobre Cooperación Internacional para la Evaluación de Datos Nucleares (WPEC) creado por la AEN de la OCDE es un ejemplo del carácter colaborativo del trabajo relacionado con los datos nucleares. Durante 25 años, el WPEC ha usado subgrupos para abordar cuestiones específicas como la Organización Internacional de Colaboración para una Biblioteca de Datos Evaluados (CIELO). Este proyecto reúne a expertos de la comunidad internacional que se ocupa de los datos sobre reacciones nucleares para determinar y documentar las discrepancias entre las bibliotecas de datos evaluados, los datos medidos y las interpretaciones de los cálculos de los modelos existentes, y aspira a avanzar en la conciliación de estas discrepancias a fin de crear evaluaciones más exactas para todas las aplicaciones. Inicialmente se centra en un pequeño número de núcleos de máxima prioridad, a saber, el hidrógeno, el oxígeno, el hierro y los actínidos mayores. Otro subgrupo del WPEC trabaja en una propuesta sobre un nuevo formato de datos estructurados moderno en lenguaje extensible de marcado (XML).

106. Las instalaciones experimentales son otra esfera de colaboración internacional. La fuente pulsada de neutrones de la instalación de tiempo de vuelo de neutrones (n_TOF) del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) ha medido muchas secciones eficaces en un amplio rango de valores de energía necesarios para la nucleosíntesis estelar, los efectos de ruptura de simetría en núcleos compuestos, la investigación de las densidades de niveles de los núcleos y las aplicaciones de la tecnología nuclear, como la transmutación de desechos nucleares, los sistemas activados por acelerador y las investigaciones sobre el ciclo del combustible nuclear (figura B-1). Un consorcio de naciones europeas ha empezado a construir uno de los mayores proyectos de infraestructura activos de Europa, la Fuente Europea de Espalación (ESS). En octubre de 2014 se puso en Lund (Suecia) la primera piedra de la ESS y se prevé generar los primeros neutrones en 2019.

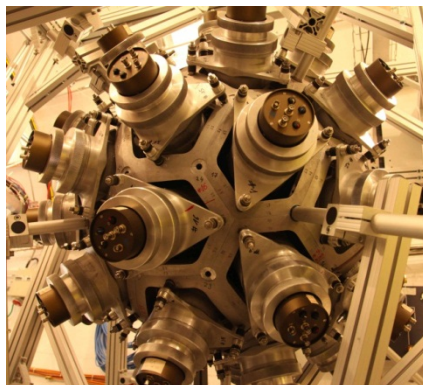


Fig. B-1. Detectores en la instalación n_TOF del CERN. (Fotografía: CERN).

107. Las instalaciones de haces iónicos radiactivos permiten medir muchos nucleidos que no pueden ser estudiados en las instalaciones convencionales. Con estos haces es posible investigar en varios dominios de la física nuclear en los límites de la estabilidad, como los núcleos creados por los procesos de captura rápida de neutrones y de protones, el cierre de capas en la proximidad de los números mágicos, y los elementos muy pesados. La instalación Spiral-2, que se está construyendo en Francia en el centro de investigación del Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados, permitirá a un gran número de investigadores internacionales tener acceso a haces iónicos radiactivos; los primeros experimentos están previstos para 2015.

108. Las actas de la Conferencia Internacional sobre Datos Nucleares para la Ciencia y la Tecnología, que se celebró en 2013 en Nueva York (Estados Unidos de América), se publicaron en una revista arbitrada (*Nuclear Data Sheets* 118–120) en 2014. En esta conferencia trienal se expuso la labor de varios centenares de científicos e ingenieros que trabajan en la producción o la utilización de datos nucleares para muchas aplicaciones.

109. Las aplicaciones que hacen un uso intenso de datos nucleares son: los reactores de fisión, en los que se centra el proyecto CIELO; las investigaciones sobre la fusión, particularmente en el marco del Reactor Termonuclear Experimental Internacional; las necesidades médicas, en especial la producción de isótopos; y la dosimetría, en la que las propiedades del espectro neutrónico pueden medirse mediante una gama de secciones eficaces de reacciones muy bien caracterizadas.

110. Los datos atómicos suelen considerarse como un área de trabajo aparte, pero en el tema de los momentos nucleares existe una amplia interacción de los datos atómicos y nucleares. La espectroscopia de estructura atómica fina experimental, en combinación con cálculos precisos de la estructura atómica, permite investigar los parámetros de la estructura nuclear, como el radio de carga, el momento dipolar magnético y el momento cuadrupolar electrostático. Los cálculos detallados de la electrodinámica cuántica, generalmente para iones pesados semejantes al helio, están ahora posibilitando la separación de los efectos Bohr-Weisskopf y de la teoría de campos en la estructura

hiperfina. En la novena Conferencia Internacional sobre Datos Atómicos y Moleculares y sus Aplicaciones, que se celebró en Jena (Alemania) del 21 al 25 de septiembre de 2014, se describieron varias aplicaciones de esta naturaleza.

111. La ciencia de la cuantificación de la incertidumbre se ha expandido rápidamente en las aplicaciones de simulación de sistemas complejos, como los meteorológicos y los climáticos. En 2013 y 2014 hubo varias reuniones en que se abordó la incipiente aplicación de la cuantificación de la incertidumbre a datos atómicos y moleculares calculados, como se ha hecho en algunos experimentos. Esta aplicación se centra en sistemas físicos simples en que los cálculos exactos son sumamente difíciles y, en cierto modo, representa una nueva rama de la ciencia de la cuantificación de la incertidumbre.



Fig. B-2. El XFEL europeo se encuentra en Hamburgo (Alemania). (Fotografía: XFEL europeo).

112. En distintas partes del mundo están entrando en funcionamiento nuevas instalaciones para usuarios de láseres de electrones libres de rayos X (XFEL) blandos y duros. Hay dos instalaciones XFEL de rayos duros en funcionamiento: la fuente de luz coherente del acelerador lineal de Stanford (Estados Unidos de América), puesta en servicio en 2009, y la instalación del Láser Angstrom Compacto de Electrones Libres del SPring-8 de Harima (Japón), que entró en funcionamiento en 2011. Las instalaciones PAL-XFEL de rayos X duros del Laboratorio de Aceleradores de Partículas de Pohang (República de Corea), el XFEL europeo de Hamburgo (Alemania) (figura B-2) y el SwissFEL, en Villigen (Suiza), se encuentran en construcción. Se prevé que los dos primeros producirán su primera luz láser en 2016. La situación de estas instalaciones y de otros láseres de electrones libres del mundo fue examinada en la 36ª Conferencia Internacional sobre Láseres de Electrones Libres, que tuvo lugar en Basilea (Suiza) en agosto de 2014. Estos XFEL se utilizan para estudiar las propiedades electrónicas de los átomos, moléculas y materiales, incluido el estudio de los procesos rápidos en moléculas biológicas complicadas como el ADN.

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

C.1. Aceleradores

113. En 2014 comenzaron dos proyectos ambiciosos y a gran escala de construcción de aceleradores que, según se prevé, estarán operacionales hacia 2020-2022. La Instalación Europea de Radiación Sincrotrónica de Grenoble (Francia) ha iniciado la modernización de su actual fuente de fotones basada en un acelerador. La fuente nueva, considerada como la cuarta generación de su clase, será más brillante que la actual (una mejora del rendimiento de un millón de veces), con un 20 % menos de consumo de

energía. Su finalidad es proporcionar una variedad de capacidades a los investigadores de una amplia gama de disciplinas, como la física, la química, la ciencia de los materiales y la biología. También se inició la construcción del acelerador de partículas de la ESS, que suministrará los haces de neutrones pulsados más intensos del mundo para la investigación científica. La ESS será una instalación basada en un acelerador que estará dedicada a la investigación sobre ciencias de los materiales mediante la dispersión neutrónica. Suministrará haces de neutrones hasta 30 veces más brillantes que cualquier fuente de neutrones actual. Está ubicada en Lund (Suecia), en los alrededores del Laboratorio MAX IV, que la complementará en las investigaciones sobre ciencias de los materiales.

114. Las instalaciones que utilizan un sincrotrón son importantes instrumentos de investigación y desempeñan una valiosa función de facilitación del desarrollo tecnológico. La demanda de tiempo de haz en estas instalaciones suele exceder la oferta en un factor de 2 a 3, lo que significa que solo pueden aprobarse y materializarse entre un tercio y la mitad de todas las propuestas de investigación. En las líneas de haz muy modernas, por ejemplo en los láseres de electrones libres, este factor es aún mayor y se sitúa en alrededor de 5. Ello hace difícil, cuando no imposible, que los grupos de investigación que empiezan a trabajar en este campo y provienen de Estados Miembros en desarrollo consigan acceso a tiempo de haz en una instalación de sincrotrón.

115. Para resolver esta situación y poder facilitar el acceso a un sincrotrón de última generación a grupos de investigación de cualquier Estado Miembro, el Organismo ha establecido una instalación experimental de técnicas múltiples como estación terminal de la línea de haz de fluorescencia de rayos X (XRF) en la instalación Elettra de Trieste (Italia) (figura C-1). El proyecto se llevó a cabo en cooperación con el Instituto Federal de Física y Tecnología de Alemania y la Universidad Técnica de Berlín.

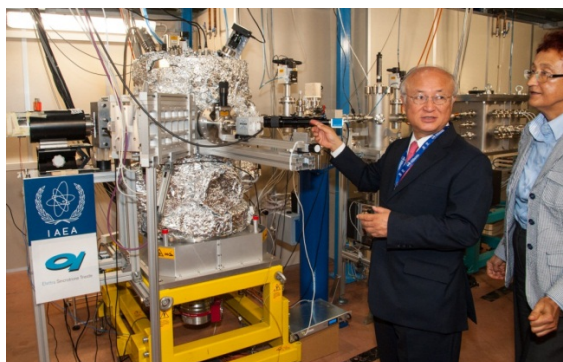


Fig. C-1. El Director General del OIEA, Yukiya Amano, y Maya Kiskinova, Coordinadora de Investigación de Elettra, ante la cámara de ultravacío en la inauguración de la nueva línea de haz XRF, el 6 de octubre de 2014. (Fotografía: Elettra).

116. La estación terminal de la línea de haz con cámara de ultravacío del Organismo permite la aplicación sinérgica de distintas metodologías de XRF y espectrometría y ofrece una caracterización elemental, química y estructural completa de los materiales. La cámara de ultravacío está equipada con un avanzado manipulador de muestras motorizado de siete ejes para mover y rotar la muestra objeto de investigación y los detectores de rayos X en diversas orientaciones con respecto al haz sincrotrónico. Entre las características óptimas de la línea de haz de XRF figuran una mayor capacidad de sintonización de la energía (de 2 a 14 keV), el flujo (5109 fotones por segundo en la modalidad de máquina de 5,5 keV, 2,4 GeV), el poder de resolución de $1,5 \times 10^{-4}$, la pequeña divergencia de haz (0,15 mrad) y un tamaño de haz en las rendijas de salida igual a $220 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$.

117. En 2014, el Organismo también puso en marcha el Portal de Conocimientos sobre Aceleradores¹⁴, un sitio web nuevo concebido para reunir a la comunidad que trabaja con aceleradores y proporcionar referencias a las partes interesadas, como los responsables de la formulación de políticas, los consejos de investigación científica y las organizaciones gubernamentales encargadas de la infraestructura humana y científica para la investigación. El portal incluye una base de datos de 196 instalaciones de aceleradores de partículas de baja y mediana energía en funcionamiento en todo el mundo. Está diseñado como una plataforma atractiva para la colaboración científica y la creación de redes, y contiene enlaces a programas informáticos y bases de datos, documentos científicos y formativos, las últimas novedades más destacadas en la investigación basada en aceleradores y anuncios de conferencias, talleres y cursos, y ofrece a los usuarios registrados la posibilidad de subir sus colaboraciones al portal.

118. La gestión de una instalación de acelerador presenta varios desafíos que la distinguen de otras instalaciones de investigación. Dado que los aceleradores suelen ser a la vez el instrumento y el objeto de investigación, esos aspectos pueden pasarse por alto fácilmente. A fin de ayudar a los Estados Miembros a responder eficientemente a los actuales desafíos económicos y técnicos, el Organismo organizó, conjuntamente con el sincrotrón SOLEIL, una Reunión Técnica sobre las Estrategias de Gestión para Instalaciones de Aceleradores, que se celebró del 15 al 19 de septiembre de 2014 en Saint-Aubin (Francia).

119. Recientemente, las fuentes de ión único capaces de implantar iones con precisión nanométrica han impulsado varias esferas de investigación y el posible desarrollo de tecnologías novedosas. Como parte de un proyecto coordinado de investigación del Organismo sobre los defectos inducidos por la radiación en semiconductores y aislantes, se utilizó la irradiación con iones únicos para evaluar las propiedades de transporte de defectos inducidos por la carga en dispositivos electrónicos dañados por la radiación. Los transitorios de corriente inducidos por iones únicos indican las propiedades del material, así como la estructura del dispositivo, y también dependen del tipo de ión. Los iones únicos pueden asimismo modificar las propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de un material en el punto de entrada del ión en el material y a lo largo de su trayectoria. La irradiación/implantación de iones únicos deterministas es una tecnología difícil pero importante que puede abrir la puerta a la modificación de materiales con control preciso de la posición.

120. Las dos imágenes de la figura C-2 muestran ejemplos de materiales modificados de esa manera. La imagen de la izquierda muestra un proceso que puede utilizarse para el micromaquinado del silicio con elementos de tan solo decenas de nanómetros, lo que permite fabricar una variedad de nuevas estructuras a escala nanométrica para su utilización en campos como la microfluídica/nanofluídica y la litografía por nanoimpresión¹⁵. La imagen de la derecha ilustra el uso de la implantación de iones únicos en la ingeniería de defectos del diamante para crear centros nitrógeno-vacante que podría tener una prometedora aplicación en la informática cuántica, los sensores magnéticos con resolución extremadamente alta o la fotónica a nivel nanométrico¹⁶. Puesto que las propiedades de los materiales se pueden modificar a lo largo de la trayectoria del ión, la técnica de irradiación con iones únicos y control de posición a nivel nanométrico es una tecnología clave para modificar las propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de los materiales.

¹⁴ El Portal de Conocimientos sobre Aceleradores está disponible en la dirección <http://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

¹⁵ AZIMI, S., *et al.*, Nanoscale lithography of LaAlO₃/SrTiO₃ wires using silicon stencil masks, *Nanotechnology* 25 (2014) 445301.

¹⁶ Takashi Yamamoto *et al.* Strongly coupled diamond spin qubits by molecular nitrogen implantation, *PHYSICAL REVIEW B* 88, 201201(R) (2013).

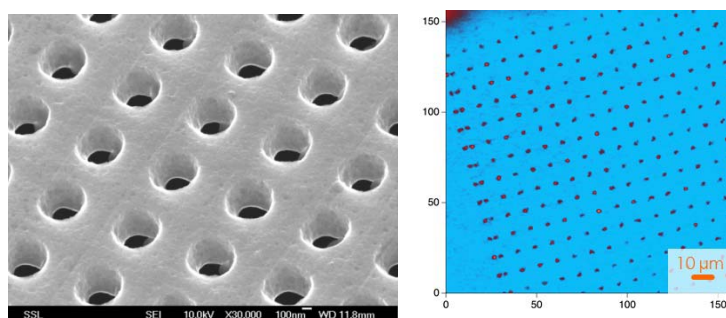


Fig. C-2. Izquierda: Imagen de microscopio electrónico de barrido de una matriz uniforme de agujeros de algunos cientos de nanómetros de diámetro en una lámina de silicio. (Fotografía: M.B.H. Breese/Universidad Nacional de Singapur). Derecha: Imagen de microscopio confocal de una retícula de centros nitrógeno-vacante creados por implantación de iones en el diamante. En cada punto de irradiación se irradiaron algunos iones de nitrógeno 15. (Fotografía: T. Ohshima/Comisión de Energía Atómica del Japón).

121. Más allá de la investigación básica y aplicada, los aceleradores de partículas son instrumentos muy importantes para las aplicaciones industriales. El desarrollo de tecnologías basadas en aceleradores capaces de producir corrientes de haces de iones sumamente estables y colimadas, de entre algunos μA y 100 mA, y energías de iones incidentes en un rango de 100 eV a ~ 10 MeV, ha proporcionado una tecnología amplia y eficaz para la fabricación de circuitos integrados para operaciones lógicas, de memoria y analógicas, así como una gama cada vez más variada de sensores ópticos y aparatos de imagenología. La implantación iónica se utiliza ahora ampliamente en la industria de los semiconductores para crear y modificar materiales electrónicos y fotónicos¹⁷. Según las estimaciones de los científicos, al presente hay más de 17 000 aceleradores en funcionamiento en instituciones de investigación, hospitales e industrias de todo el mundo¹⁸.

C.2. Reactores de investigación

122. Los reactores de investigación se usan principalmente como fuente de neutrones para la investigación y para diversas aplicaciones, las más frecuentes de las cuales se indican en el cuadro C-1. Su potencia puede variar entre cero (p. ej., en conjuntos críticos o subcríticos) y aproximadamente 200 MW(t), que es todavía un valor pequeño en comparación con los 3000 MW(t) de una central nuclear típica. Los reactores de investigación presentan una diversidad de diseño mucho mayor que los reactores de potencia, y tienen asimismo distintos modos de funcionamiento, que pueden ser constantes o pulsantes.

¹⁷ FELCH, S.B *et al.*: Ion Implantation for Semiconductor devices: the largest use of industrial accelerators, Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA, USA, page 740, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/papers/weyb2.pdf>.

¹⁸ Industrial Accelerators and their applications, Eds.: Robert W. Hamm y Marianne E. Hamm; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2012.

Cuadro C-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo¹⁹.

Tipo de aplicación ^a	Número de reactores de investigación ^b	Estados Miembros en que se encuentran las instalaciones utilizadas
Enseñanza/capacitación	178	55
Análisis por activación neutrónica	129	53
Producción de radioisótopos	100	44
Irradiación de materiales/combustible	85	30
Radiografía neutrónica	74	41
Dispersión neutrónica	53	35
Transmutación (dopado del silicio)	31	20
Geocronología	26	22
Transmutación (gemas)	22	13
Terapia neutrónica, principalmente I+D	19	13
Otros ^c	141	38

^a Estas aplicaciones se describen en mayor detalle en la reciente publicación del Organismo titulada *Applications of Research Reactors (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.3, 2014)*.

^b De un total de 284 reactores de investigación examinados (247 en funcionamiento, 19 en régimen de parada temporal, 6 en construcción y 12 planificados; 31 de diciembre de 2014).

^c Los otros tipos de aplicación comprenden la calibración y el ensayo de instrumentación y dosimetría, experimentos de blindaje, experimentos de física de los reactores, mediciones de datos nucleares y visitas y seminarios de relaciones públicas.

123. Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo, hasta ahora se han construido 747 reactores de investigación, 247 de los cuales estaban en funcionamiento al 31 de diciembre de 2014. La Federación de Rusia tiene el mayor número de reactores de investigación operativos, (incluidas las instalaciones críticas) con 49, seguida de los Estados Unidos de América (41), China (15) y Francia (12). Muchos países en desarrollo también tienen reactores de investigación (p. ej., en África funcionan ocho instalaciones). En el mundo hay 57 reactores de investigación que operan a niveles de potencia de más de 5 MW y que por lo tanto ofrecen flujos neutrónicos altos para aplicaciones de alta capacidad.

124. La mayor parte de los reactores de investigación en funcionamiento siguen estando muy subutilizados y tienen en promedio más de 45 años de antigüedad. En consecuencia, muchos de ellos requieren constante atención en lo que respecta a la gestión del envejecimiento, la modernización y la renovación. El interés en su utilización estratégica y en la planificación estratégica de las actividades sigue creciendo, con miras a aumentar la utilización y generar ingresos adicionales. En los dos últimos años, 37 instalaciones con reactores de investigación elaboraron planes estratégicos y los presentaron al Organismo para su examen. Como resultado de este proceso de examen, el Organismo organizó en octubre de 2014 un taller de seguimiento para difundir las lecciones aprendidas y dar a conocer las buenas prácticas entre sus Estados Miembros. La colaboración internacional para promover y mejorar la utilización de los reactores de investigación con fines de enseñanza y capacitación sigue adelante. Un ejemplo de ello es el proyecto de Reactor-Laboratorio por Internet en América Latina y Europa, cuyo objeto es conectar entre sí a las universidades con reactores de investigación en funcionamiento dedicados a la enseñanza y la capacitación.

¹⁹ Fuente: Base de Datos de Reactores de Investigación (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>) del Organismo.



Fig. C-3. La Autoridad Regulatoria Nuclear de la Argentina ha otorgado una licencia de construcción para el reactor de investigación RA-10, que se utilizará para aumentar la producción nacional de radioisótopos para ensayos de materiales y combustibles, el dopado del silicio y actividades de investigación y desarrollo. (Imagen: Comisión Nacional de Energía Atómica).

125. Varios países se encuentran en diferentes etapas de la construcción de reactores de investigación nuevos, como instalaciones nacionales clave para el desarrollo de infraestructura y programas de ciencia y tecnología nucleares, comprendida la energía nucleoelectrónica. Se están construyendo nuevos reactores de investigación en la Arabia Saudita, la Argentina (figura C-3), Francia, la Federación de Rusia, Jordania y la República de Corea. Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para construir nuevos reactores de investigación, entre ellos Bélgica, el Brasil, los Estados Unidos de América, la India, los Países Bajos y Viet Nam. Otros, como Azerbaiyán, Bangladesh, Belarús, Bolivia, Kuwait, Mongolia, Nigeria, la República Unida de Tanzania, Sudáfrica, el Sudán, Tailandia y Túnez, están estudiando la posibilidad de construir reactores de investigación nuevos²⁰.

126. Se prevé que el número de reactores de investigación nacionales en funcionamiento seguirá disminuyendo conforme se vayan clausurando los reactores más antiguos y sustituyendo por reactores de investigación compartidos entre varios países. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar un acceso amplio a estas instalaciones y su uso eficiente. En este contexto, las redes y coaliciones regionales de reactores de investigación, propiciadas por el Organismo²¹, ayudan a potenciar la cooperación internacional y permiten a los reactores de investigación ampliar sus comunidades de usuarios y partes interesadas. Además, en 2014 el Organismo puso en marcha un nuevo sistema de colaboración, el Centro Internacional basado en un Reactor de Investigación designado por el OIEA.

127. Durante 2014, la Iniciativa para la Reducción de la Amenaza Mundial (IRAM) de los Estados Unidos de América siguió llevando a cabo su misión de reducir al mínimo la utilización de uranio muy enriquecido (UME) en el sector nuclear civil. Al final de 2014, 92 de los 200 reactores de investigación comprendidos en el ámbito de aplicación de la IRAM ya estaban utilizando combustible de UPE o se encontraban en régimen de parada confirmado, incluida una instalación de producción de molibdeno 99 que empleaba UME. Entre los éxitos importantes cabe mencionar la preparación y carga por la Federación de Rusia del núcleo de combustible de UPE en el reactor ARGUS, que alcanzó la criticidad por primera vez en julio, y la descarga del combustible de UME líquido del reactor FOTON, en Uzbekistán, puesto en régimen de parada. En 2014, China, Ghana y el Organismo firmaron un acuerdo para apoyar la conversión del reactor de investigación GHARR-1 mediante la transferencia de combustible de UPE. Se clarificaron los requisitos técnicos fundamentales y se adoptó un plan de acción para llevar a la práctica la conversión y la devolución del UME.

²⁰ La publicación del Organismo *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.1)* está concebida para ayudar a los Estados Miembros en esta esfera.

²¹ El Organismo ha formado varias coaliciones diferentes de reactores de investigación, en el Báltico, el Caribe, África Central, Asia Central, Europa Oriental y la región del Mediterráneo, así como en la Comunidad de Estados Independientes.

128. Entre las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de UME se incluye la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país en el que fue enriquecido. Al final de 2014, el programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense había alcanzado sus objetivos en un 76 %, con la retirada de casi 1300 kg de combustible de UME irradiado y sin irradiar de reactores de investigación. En cuanto al UME de origen ruso, el programa de devolución se había ejecutado en un 86 %, con la retirada de 2160 kg de combustible de UME irradiado y sin irradiar de reactores de investigación. Tras la conversión al uso de combustible de UPE del reactor de investigación polaco Maria, en septiembre se devolvieron a la Federación de Rusia 53 kg de combustible de UME gastado. Kazajstán devolvió a la Federación de Rusia 10,2 kg de combustible de UME sin irradiar y 37,3 kg de combustible de UME gastado procedentes de la instalación WWR-K, en Alatau (en proceso de conversión de UME a UPE) (figura C-4).

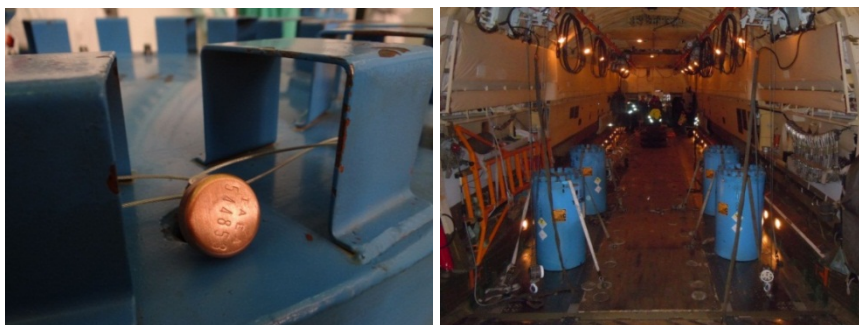


Fig. C-4. Precinto de salvaguardias del Organismo en un contenedor de transporte TK-S16 (izquierda). Preparación de los contenedores de transporte para el vuelo desde Almaty (Kazajstán) a la Federación de Rusia (derecha).

129. La conversión al UPE y la repatriación del combustible de UME suelen ir acompañadas de importantes mejoras de la infraestructura. Por ejemplo, la Iniciativa del Organismo sobre los Usos Pacíficos financia un programa de modernización completa del reactor de investigación TRIGA Mark III de México.

130. Para la conversión de los reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan los combustibles de uranio-molibdeno avanzados y de muy alta densidad que actualmente están en desarrollo. Aunque se han hecho avances sustanciales en este campo, se requerirán más esfuerzos y ensayos, particularmente en relación con los programas de examen de irradiación y post-irradiación, así como en la esfera de las técnicas de manufactura, para llegar a tener combustibles de UPE cualificados disponibles comercialmente. En noviembre, la compañía de combustible TVEL de la Federación de Rusia firmó un contrato para empezar a suministrar combustible de UPE al Reactor de Alto Flujo de los Países Bajos.

131. Aunque no hubo ninguna escasez importante de molibdeno 99 en 2014, persisten las dificultades operativas en las instalaciones de procesamiento y en los reactores de investigación más antiguos. Gracias a algunos cambios en la demanda y al aumento de la eficiencia, así como a cierta diversificación del suministro, los leves déficits no provocaron una crisis de la magnitud de la vivida entre 2007 y 2010. La conversión de UME a UPE de los procesos de producción de isótopos de uso médico continúa, y la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) y NTP Radioisotopes, de Sudáfrica, siguen siendo los principales proveedores de molibdeno 99 no producido a partir de UME. En 2014 ANSO comenzó a construir su nueva planta de producción de molibdeno 99, con la que prevé aumentar la producción semanal de molibdeno 99 basado en UPE de 1000 a 3000 curios al sexto día. NTP Radioisotopes prosigue con la conversión de sus procesos para utilizar exclusivamente UPE. Otros dos grandes productores de isótopos de uso médico, el Instituto de Radioelementos de Bélgica y Mallinckrodt, de los Países Bajos, han comenzado a desplegar esfuerzos para apoyar la conversión de UME a UPE de sus procesos de producción a escala comercial.

D. Técnicas nucleares para mejorar la sanidad animal

132. Las tecnologías nucleares y relacionadas con la energía nuclear están desempeñando un papel importante en la sanidad animal, particularmente en relación con el diagnóstico de enfermedades y la caracterización de organismos patógenos. El presente examen se centra en cómo y dónde han incidido las tecnologías nucleares, tanto los métodos isotópicos como los no isotópicos, en el pasado y dónde cabe esperar que puedan incidir en el futuro.

D.1. Utilización de vacunas irradiadas para proteger al ganado de las enfermedades transfronterizas de los animales

133. La vacunación es un instrumento crítico para proteger a los animales y los seres humanos contra enfermedades potencialmente mortales. La mayor parte de las vacunas se basan en alguna forma de atenuación o inactivación del agente patógeno por métodos ya sea químicos o físicos, manteniendo en ambos casos la inmunogenicidad y, por lo tanto, induciendo respuestas inmunitarias de protección. En general, las vacunas vivas atenuadas producen una protección mejor y más fuerte que las vacunas inactivadas, ya que el proceso de inactivación destruye algunas de las proteínas que son importantes para la inducción de una buena inmunidad.

134. La irradiación es una alternativa al tratamiento químico o físico para desarrollar vacunas. Se puede aplicar de modo que el ácido nucleico genómico del agente patógeno se destruya o debilita progresivamente pero conservando sus propiedades antigénicas y, por lo tanto, desencadenando una mejor respuesta inmunitaria del huésped. Los recientes avances en el desarrollo de vacunas irradiadas han demostrado que es posible obtener microorganismos metabólicamente activos pero que no se replican, que pueden estimular una respuesta inmunitaria parecida a la que provoca la exposición a un agente patógeno vivo. Se pone en el irradiador un cultivo purificado de un agente patógeno vivo, refrigerado o congelado, y se lo expone a la radiación según un programa que estipula un tiempo y un nivel de energía específicos. Por ejemplo, para un tripanosoma se utiliza un grado de irradiación de ~100 Gy. La solución patógena irradiada se mezcla después con crioprotectores para estabilizar la solución durante el proceso de liofilización antes de utilizarlo como vacuna experimental²².

²² Duxbury RE, Anderson JS, Welde BT, Sadun EH, Muriithi IE (1972a). *Trypanosoma congolense*: Immunization of mice, dogs, and cattle with gamma-irradiated parasites. *Experimental Parasitology*, 32:527-533.

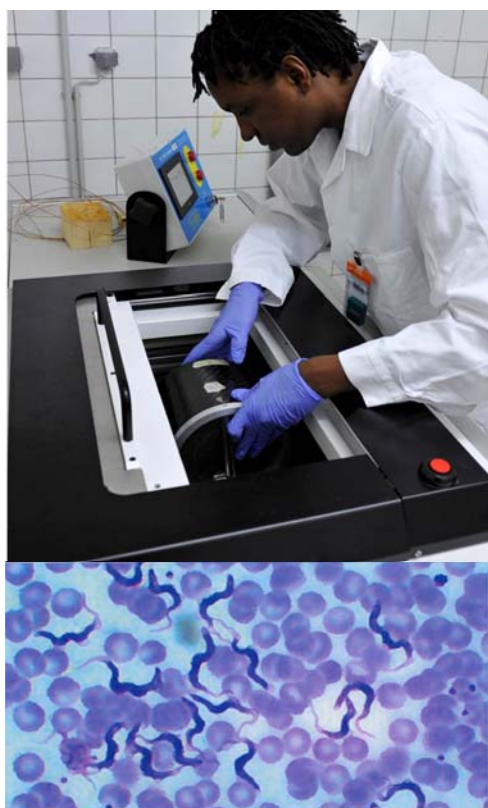


Fig. D-1. Irradiación de cultivos de tripanosomas (*T. evansi*) in vitro mediante una fuente de rayos X.

135. Para irradiar agentes patógenos se utilizan generalmente fuentes de cobalto 60; no obstante, también se pueden emplear rayos X y haces de electrones. La dosis varía en función del organismo patógeno. Algunos estudios han mostrado que las larvas en tercer estado de los parásitos *Haemonchus contortus* y *Strongylus colubriformis* atenuadas por la exposición a 600 y 700 Gy respectivamente protegen a las ovejas contra estas infecciones parasitarias²³. La lombriz pulmonar *Dictyocaulus viviparus* requiere una dosis inferior (400 Gy), ya que de lo contrario el trematodo no puede migrar a los pulmones para empezar a inducir la inmunidad protectora²⁴. Las bacterias como la *Brucella* pueden atenuarse con 3000 Gy²⁵, la *Pasteurella* con 6000 Gy²⁶ y el *Bacillus anthracis* con 20 000 Gy²⁷. Los virus requieren dosis más elevadas que afecten a sus proteínas y estructura. El virus de la fiebre aftosa se inactiva con 40 000 Gy²⁸ y el de la lengua azul requiere de 60 000 a 100 000 Gy²⁹.

²³ Sivanathan S, Duncan JL, Urquhart GM (1984). Some factors influencing the immunisation of sheep with irradiated *Haemonchus contortus* larvae. *Veterinary Parasitology*, 16:313-23.

²⁴ Winter MD, Wright C, Lee DL (2000). Vaccination of young lambs against infection with *Nematodirus battus* using gamma irradiated larvae, *International Journal of Parasitology*, 30: 1173-1176.

²⁵ Dabral N, Martha-Moreno-Lafont, Sriranganathan N, Vemulapalli R (2014). Oral Immunization of Mice with Gamma-Irradiated *Brucella neotomae* Induces protection against Intraperitoneal and Intranasal Challenge with Virulent *B. abortus* 2308. *PLoS One* 9(9): e107180. doi:10.1371/journal.pone.0107180.

²⁶ Dauphin LA, Newton BR, Rasmussen MV, Meyer RF, Bowen MD (2008). Gamma Irradiation Can Be Used To Inactivate *Bacillus anthracis* Spores without Compromising the Sensitivity of Diagnostic Assays. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 4427-4433.

²⁷ Aloni-Grinstein R, Gat O, Altboum Z, Velan B, Cohen S, Shafferman A (2005). Oral Spore Vaccine Based on Live Attenuated Nontoxigenic *Bacillus anthracis* Expressing Recombinant Mutant Protective Antigen. *Infection and Immunity* 4043-4053.

²⁸ Motamedi Sedeh F, Khorasani A, Shafae K, Fatolahi H, Arbabi K (2008). Preparation of FMD type A87/IRN inactivated vaccine by gamma irradiation and the immune response on guinea pig. *Indian J. Microbiol.*, 48:326-330.

D.2. Técnicas nucleares para el diagnóstico precoz y rápido de las enfermedades transfronterizas de los animales y zoonóticas

136. El diagnóstico precoz y rápido es esencial para controlar las enfermedades transfronterizas. Para detectar agentes patógenos o anticuerpos se realizan las pruebas de diagnóstico en muestras tomadas del huésped (sangre, suero, tejidos y secreciones). El marcado isotópico ha jugado un papel decisivo en la mejora de las pruebas de diagnóstico de enfermedades al objeto de identificar los agentes patógenos o sus antígenos o anticuerpos (proteínas producidas por la exposición a los antígenos de un microorganismo patógeno).

137. Antes, para detectar una enfermedad en una muestra, se realizaban inmunoanálisis que utilizaban ADN o proteínas radiomarcados de un agente patógeno determinado como antígeno para provocar una respuesta inmunitaria. Esos análisis se hacían principalmente en laboratorios cualificados, pero la sustitución del marcado isotópico por enzimas y tinciones fluorescentes permitió luego la amplia difusión de las pruebas a otros laboratorios. La utilización de enzimas y tinciones fluorescentes, aunque práctica, no alcanzó nunca el alto nivel de especificidad y sensibilidad que se observa con los radioisótopos. Cuando se requieren niveles elevados de sensibilidad y especificidad (p. ej., para diagnosticar la gripe aviar H5N1, la fiebre aftosa, la fiebre del valle del Rift o la peste porcina africana), el marcado isotópico es una técnica de diagnóstico precoz y rápido sumamente fiable. El Organismo fue pionero en el desarrollo de análisis asequibles y de calidad garantizada para el diagnóstico de algunas enfermedades infecciosas y parasitarias, como la fiebre aftosa, la brucelosis, la peste bovina y la tripanosomiasis.



Fig. D-2. El personal capacitado de numerosos laboratorios nacionales de diagnóstico de enfermedades ha implementado en sus países de origen técnicas nucleares y moleculares para el control de las enfermedades animales y zoonóticas.

138. El advenimiento de las tecnologías de amplificación de ácidos nucleicos (por ej., la reacción en cadena de la polimerasa) supuso una mejora espectacular en el diagnóstico de las enfermedades infecciosas. Ello permitió el diagnóstico precoz, rápido y de confirmación de agentes patógenos especialmente infecciosos, o difíciles de aislar y cultivar *in vitro*. La detección de ácidos nucleicos comenzó con el marcado de ADN y/o ARN con trazadores como azufre 35, metionina marcada con azufre 35, fósforo 35 y fósforo 32. La principal ventaja es que se pueden detectar en el animal niveles de infección extremadamente bajos (p. ej., sondas de ADN preparadas con *Haemonchus placei*, *Ostertagia ostertagi*, *Cooperia oncophora* y *Oesophagostomum radiatum* han podido detectar cantidades de apenas 25 huevos en muestras fecales de cabras, ovejas y ganado bovino infectados)³⁰. Ello ha hecho posible la detección de un agente patógeno antes de que comience la enfermedad.

²⁹ Campbell CH (1985). Immunogenicity of bluetongue virus inactivated by gamma irradiation. *Vaccine*, 3: p401.

³⁰ Höglund J, Engström A, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Tydén E (2013). Real-time PCR detection for quantification of infection levels with *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in cattle faeces. *Veterinary Parasitology*, 197: 251-257.

139. Las técnicas derivadas de la energía nuclear están ayudando a combatir los actuales brotes de la enfermedad por el virus del Ébola (EVE) en África Occidental. El Organismo ha comenzado un proyecto de tres componentes dirigido a apoyar la creación de capacidad, la prevención y la detección precoz, y a mejorar los instrumentos de diagnóstico existentes. El primer componente consiste en el suministro de apoyo técnico y de equipamiento, reactivos y material fungible para el personal de diagnóstico ya establecido sobre el terreno. El segundo componente abordará la naturaleza zoonótica de la EVE y vigilará la interacción de los animales (la fauna silvestre) y los humanos a fin de prevenir la intrusión de virus de portadores animales naturales en la población humana o detectarla en forma precoz. El tercer componente abordará las redes de laboratorios de diagnóstico oficiales que funcionan bajo la égida de las autoridades veterinarias y/o de salud pública. Ello conllevará la implementación adaptativa o la mejora de los instrumentos de diagnóstico existentes para asegurar la detección precoz, rápida, sensible, específica y de calidad garantizada de la EVE y su seguimiento. Este conjunto amplio de medidas ayudará a los países en riesgo a gestionar los brotes de EVE en curso, y a responder rápidamente a toda amenaza futura de esta enfermedad.

D.3. Técnicas nucleares para el seguimiento y la vigilancia de las enfermedades animales transfronterizas y zoonóticas

140. En un mundo en que el movimiento de animales o de productos de origen animal es constante y en que las modificaciones del medio ambiente debidas al cambio climático pueden influir en la propagación de las enfermedades infecciosas y sus vectores, es fundamental disponer de tecnologías que permitan determinar el origen geográfico de esas enfermedades y, cuando sea preciso, proporcionen información sobre los hábitos alimentarios y los correspondientes desplazamientos de sus vectores. La técnica del análisis de isótopos estables puede proporcionar el medio para entender la epidemiología de las enfermedades. Los isótopos estables son las formas naturales de elementos que no experimentan decaimiento radiactivo. Existen más de 250; sin embargo, solo algunos de ellos participan en procesos biológicos y ecológicos importantes. Los isótopos se miden mediante la espectrometría de masas, que determina las diferencias isotópicas con respecto a patrones internacionales, y se expresan como cocientes en valores de delta (δ), en partes por mil. La utilidad del análisis de isótopos estables se basa en la sólida correlación entre los niveles de ciertos isótopos en el medio ambiente y la concentración de los mismos isótopos en los tejidos animales.

141. Las razones isotópicas del hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) y del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en los tejidos de los animales se utilizan para estudiar los movimientos de estos, puesto que reflejan con exactitud sus desplazamientos entre los distintos hábitats de alimentación, como lagos, ríos, océanos y aguas subterráneas. El uso de los isótopos estables para caracterizar una población entraña el examen de las firmas isotópicas de unos pocos individuos que sean representativos de la población completa. Desde hace varios años se están haciendo estudios con isótopos estables para caracterizar y diferenciar poblaciones animales (especialmente aves) utilizando los valores de $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ en tejidos metabólicamente activos (sangre y tejido muscular), pero por el momento los trazadores más eficaces parecen ser los isótopos del hidrógeno que se encuentran en tejidos metabólicamente inertes de crecimiento estacional, como las plumas, los picos y las garras. Las plumas retienen esta información hasta que se cambian o mudan, típicamente una vez al año. En cambio, las garras crecen constantemente y por lo tanto pueden, en teoría, proporcionar un perfil integrado en el tiempo, que depende de las tasas de crecimiento de las garras. Una vez que se conoce el perfil isotópico de una población de aves determinada, cualquier individuo de la población puede proporcionar información sobre la migración mundial de esa especie.



Fig. D-3. El análisis de isótopos estables ayuda a determinar el papel de las aves migratorias en la propagación del virus de la gripe aviar a través de los continentes.



Fig. D-4. Vacunación de un pollo por vía ocular.

E. Adelantos en la dosimetría de la radiación médica

142. El uso de la radiación ionizante con fines médicos está firmemente establecido. En la radioterapia, la radiación se emplea para destruir células malignas, y la dosis de radiación aplicada al volumen diana es el medio para tratar a los pacientes. En la imagenología médica, la radiación se utiliza para producir una imagen de diagnóstico, y la dosis que pueda recibir el paciente es solo un efecto secundario inevitable. Aunque los principios básicos y los objetivos de la radioterapia y el radiodiagnóstico difieren considerablemente, el conocimiento de la dosis de radiación es de importancia vital en todos los casos, ya sea para verificar que el tratamiento se está administrando como se ha prescrito o para estimar el riesgo que entraña la exposición del paciente a la radiación durante un procedimiento de imagenología médica.

E.1. Imagenología médica

E.1.1. Dosimetría clínica en la radiología de diagnóstico

143. El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas ha destacado que el uso médico de la radiación, especialmente en la radiología de diagnóstico, es con mucho la mayor fuente antropógena de exposición a la radiación ionizante, y sigue

aumentando a un ritmo considerable.³¹ Esto se debe principalmente a los numerosos exámenes de rayos X que se practican, y al uso, a veces inadecuado, de técnicas complejas que entrañan dosis altas, como la tomografía computarizada (TC).

144. Por consiguiente, es necesario monitorizar y controlar las dosis que reciben los pacientes y optimizar el diseño y el comportamiento de los sistemas de imágenes de rayos X. La dosimetría clínica es la responsabilidad principal del físico médico especializado en radiología diagnóstica y se ha introducido en la legislación y los reglamentos nacionales de muchos países. Las mediciones dosimétricas en la radiología de diagnóstico son necesarias para establecer y utilizar niveles de orientación, evaluar el comportamiento del equipo y determinar el riesgo comparativo.

145. La imagenología de diagnóstico con rayos X comprende una variada gama de exámenes, desde la simple radiografía de proyección hasta la imagenología dinámica avanzada de cortes transversales. Ello ha dado lugar a un amplio abanico de cantidades dosimétricas, técnicas e instrumentos de medición, que suponen un reto para las personas que trabajan en entornos clínicos.

146. En general, las cantidades utilizadas para la dosimetría en la radiología de diagnóstico pueden dividirse en dos categorías amplias:

- i) Las cantidades específicas de la aplicación, que son cantidades dosimétricas prácticas que pueden medirse directamente y adaptarse a situaciones o modalidades concretas. Incluyen el kerma en aire incidente, el producto kerma en aire-área (utilizado principalmente para la imagenología de proyección) y los índices de kerma en aire de la TC, para las imágenes de cortes transversales (figura E-1).
- ii) Las cantidades relacionadas con el riesgo, que pueden utilizarse para estimar el detrimento o riesgo causado por la radiación y, por lo tanto, indican la dosis absorbida. Estas cantidades no pueden medirse directamente, sino solo derivarse mediante un cálculo a partir de las cantidades específicas de la aplicación, o mediante la computación con modelos apropiados.



Fig. E-1. Medición de la dosis en TC en un maniquí estándar de polimetil metacrilato y en aire.

147. Según la modalidad diagnóstica y el tipo de medición de dosis que se requiera, pueden utilizarse varias clases de dosímetro, siempre que tengan una sensibilidad y una respuesta energética adecuada, pero por lo general se emplean cámaras de ionización de unos pocos centímetros cúbicos de volumen, o detectores de estado sólido diseñados específicamente para estas mediciones. Otros tipos de dosímetro que se utilizan frecuentemente en la radiología de diagnóstico son las películas (ya sea radiográficas o radiocrómicas), los dosímetros termoluminiscentes y los dosímetros de luminiscencia estimulada ópticamente.

³¹ Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, UNSCEAR 2008 Report: Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.

148. Los trabajos del Organismo en este ámbito se han centrado en la armonización y normalización de los patrones aplicables a los pacientes en los hospitales.

E.1.2. Dosimetría interna en la medicina nuclear

149. Las aplicaciones clínicas de la medicina nuclear comprenden la imagenología de diagnóstico y los tratamientos terapéuticos. En la medicina nuclear de diagnóstico, la dosimetría interna tiene por objeto medir las dosis recibidas por los órganos sanos, mientras que en la radioterapia molecular se utiliza para establecer las dosis absorbidas por los tumores y los órganos de riesgo.

150. Los procedimientos diagnósticos de la medicina nuclear permiten obtener imágenes funcionales de tejidos normales y enfermos, y sus aplicaciones más comunes son la localización de tejidos malignos y la evaluación de la perfusión miocárdica. La cantidad de radiactividad administrada a los pacientes suele ser baja, y los beneficios diagnósticos del procedimiento de obtención de imágenes compensan con creces los riesgos. Aun así, las dosis administradas a los tejidos y sus riesgos estocásticos deberían cuantificarse para cada paciente y situarse en el contexto de los valores acumulativos recibidos por esa persona a lo largo de múltiples sesiones de obtención de imágenes o como resultado de otros procedimientos de imagenología diagnóstica (como la CT o la fluoroscopia). Así pues, la cantidad de actividad administrada debe optimizarse, a fin de obtener imágenes de la máxima calidad diagnóstica con el mínimo riesgo para el paciente. Esto es particularmente importante en el caso de los pacientes pediátricos, debido a la mayor radiosensibilidad de sus órganos y al número más elevado de años en que podrían manifestarse los posibles efectos estocásticos.

151. En la medicina nuclear terapéutica se emplean agentes radiactivos para tratar distintas formas de cáncer y otras enfermedades. Mientras que en la radioterapia externa se prescribe la dosis de radiación que se ha de aplicar al órgano o tejido diana y se utiliza un sistema de planificación del tratamiento para programar con exactitud la dosis prescrita a cada paciente, en la medicina nuclear terapéutica no se aplica un proceso personalizado de este tipo. En cambio, la actividad administrada al paciente se determina en función del tipo de tumor que se ha de tratar (por ej., 150 milicurios de yodo 131 para el cáncer de tiroides). A menudo no se realiza ninguna evaluación previa al tratamiento, y las dosis recibidas por los tejidos diana y los órganos de riesgo no se optimizan, lo que en la mayoría de los casos se traduce en un tratamiento insuficiente del paciente. Esto se debe, entre otras cosas, a la falta de formación, recursos y métodos normalizados para la aplicación de una dosis prescrita al tumor, y a la escasez de datos sobre las relaciones dosis-respuesta de los tumores. Esta situación está cambiando lentamente, y la comunidad científica está tomando cada vez más conciencia de que la dosimetría clínica específica es esencial para una eficacia óptima y para la seguridad del paciente.

152. En la dosimetría interna, las dosis absorbidas por los tejidos (la cantidad de energía de la radiación ionizante que se absorbe por unidad de masa del tejido) se determinan generalmente mediante el método de la dosis médica de radiación interna. Este método requiere el cálculo de la actividad acumulada (el número total de desintegraciones ocurridas en el tiempo) para cada órgano fuente en que se absorbe el radiofármaco. También requiere la asignación de valores S (la dosis absorbida en los tejidos diana por desintegración en cada tejido fuente) sobre la base de los modelos anatómicos de referencia aceptados internacionalmente (figura E-2).

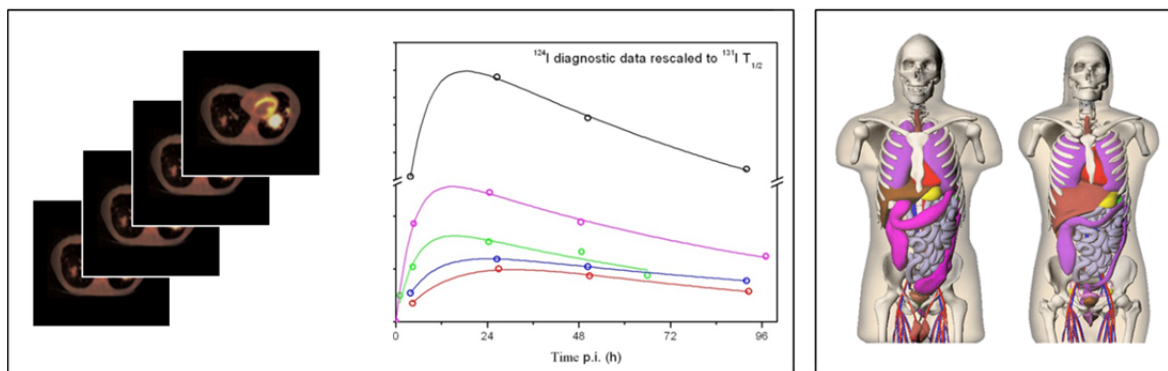


Fig. E-2. Izquierda: Serie de imágenes y curvas derivadas de la actividad en función del tiempo para diferentes órganos fuente. Derecha: Ejemplos de modelos matemáticos utilizados para los cálculos de los valores S .

E.2. Radioterapia

153. Un requisito fundamental del proceso de radioterapia es que existan procedimientos y patrones dosimétricos de referencia coherentes. En la dosimetría externa, los patrones de dosis absorbida en agua se han adoptado casi universalmente, gracias a códigos de práctica tales como el que se titula *Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos - Un Código de Práctica Internacional para la dosimetría basada en patrones de dosis absorbida en agua* (Colección de Informes Técnicos N° 398, OIEA, 2000), en la dosimetría de rayos X de megavoltaje para aceleradores lineales y aparatos de cobalto 60 de uso médico. Sin embargo, recientemente se ha registrado un aumento de las técnicas de radioterapia que utilizan campos pequeños, como las diversas formas de radioterapia estereotáctica, radioterapia estereotáctica corporal, radiocirugía estereotáctica y radioterapia de intensidad modulada. Estas novedades han acrecentado la incertidumbre de la dosimetría clínica y han puesto en tela de juicio la idoneidad de la aplicación, en esta esfera, de los protocolos de dosimetría de referencia para la radioterapia convencional, como los recogidos en el informe N° 398 de la *Colección de Informes Técnicos*. En algunos casos han ocurrido accidentes lamentables debido al uso de métodos y procedimientos que eran adecuados para los campos grandes, pero no para los pequeños. Por consiguiente, se está preparando un código de práctica para la dosimetría en campos fotónicos pequeños estáticos, que normalizará la dosimetría en campos pequeños.

154. Desde la publicación del N° 398 de la *Colección de Informes Técnicos*, se han desarrollado muchos sistemas diferentes de emisión de haces de partículas para la radioterapia, como los haces de protones y de iones pesados. Estos sistemas permiten mejorar el tratamiento del tumor sin aumentar el daño causado al tejido normal. Se están elaborando códigos de práctica para facilitar la dosimetría exacta de estos haces.

155. Las cámaras calibradas de tipo pozo son el dosímetro preferido para la calibración de las fuentes radiactivas utilizadas en la braquiterapia. Sin embargo, no existen directrices internacionales armonizadas para la garantía y/o el control de calidad de todas las fuentes que se emplean en la braquiterapia, ni tampoco de toda la instrumentación dosimétrica recomendada para ello. Muchos hospitales carecen de equipo calibrado, de procedimientos de redundancia interna o de acceso fácil a intercomparaciones independientes. Ello hace que se empleen una serie de metodologías diferentes para determinar la intensidad de la fuente. Se están desplegando esfuerzos para establecer patrones de dosis absorbida en agua, a fin de lograr la armonización con los códigos de práctica para la dosimetría en la radioterapia externa, incluido el informe N° 398 de la *Colección de Informes Técnicos*.

F. Novedades en el ámbito de los radiofármacos

156. El avance de la medicina nuclear depende del desarrollo de métodos eficientes para la producción de radionucleidos nuevos. Se han hecho progresos impresionantes en el desarrollo de tecnologías de producción de radioisótopos, como lo demuestra la reciente introducción de los ciclotrones de alta energía y alta corriente. Este adelanto ha permitido un acceso más amplio a varios radionucleidos nuevos, como el galio 68, el cobre 64, el circonio 89 y el zinc 63, y ha facilitado el desarrollo de tecnologías basadas en aceleradores para la producción comercial de tecnecio 99m, que sigue siendo el radionucleido más ampliamente utilizado con fines de diagnóstico. La disponibilidad de nuevos radioisótopos para aplicaciones médicas podría resolver problemas clínicos hasta ahora insospechados. Estos adelantos están modificando radicalmente el panorama de la medicina nuclear.

F.1. Avances en las tecnologías de producción

157. Las recientes mejoras tecnológicas relacionadas con los ciclotrones están aumentando los rendimientos de importantes radionucleidos de uso médico y haciendo posible su utilización clínica generalizada. Un problema grande para las aplicaciones médicas de los radiofármacos es la necesidad de contar con un suministro constante de los radioisótopos clave, que son los componentes esenciales de estos agentes diagnósticos y terapéuticos. Como se describe más adelante, hay nuevos radiofármacos, obtenidos a partir de varios radionucleidos diferentes, que están demostrando propiedades muy prometedoras para el diagnóstico y el tratamiento del cáncer. Sin embargo, la disponibilidad de esos importantes radioisótopos se ve limitada actualmente por los bajos rendimientos de su producción, que se realiza en ciclotrones médicos de baja energía y baja corriente. Otro reto es la parada prevista de los reactores nucleares que han generado el suministro mundial de tecnecio 99m, un radioisótopo que todavía cumple un papel fundamental en la imagenología nuclear de diagnóstico.

158. La tecnología de los ciclotrones aplicada a la producción de radionucleidos de uso médico es ahora una tecnología madura. Las energías protónicas disponibles en los ciclotrones comerciales varían entre 6 MeV y 70 MeV. Se han hecho avances importantes con el aumento constante de la corriente de protones, que puede llegar a ser de 750–800 μ A. Los flujos de alta corriente superan las limitaciones de los rendimientos de la producción de radionucleidos causadas por los bajos valores de las secciones eficaces de la interacción protónica. La disponibilidad de flujos de alta corriente ha estimulado avances importantes en la tecnología para el ensamblaje de blancos sólidos capaces de disipar eficientemente el considerable calor generado por esas corrientes elevadas. Con estos nuevos logros tecnológicos, será posible producir algunos radionucleidos de importancia crucial, como el galio 68, el estroncio 82, el tecnecio 99m y otros, en cantidades mayores y asegurar así una oferta más amplia.

159. Las interrupciones mundiales en el suministro de molibdeno 99 ($Mo\ 99$), el radionucleido padre que produce el radionucleido de diagnóstico más ampliamente utilizado, el tecnecio 99m, han acelerado la búsqueda de otras fuentes de tecnecio 99m ($Tc\ 99m$). Entre estas figura la utilización de aceleradores lineales y ciclotrones. A diferencia del proceso de fisión habitual para producir $Mo\ 99$ en un reactor que usa blancos de uranio, estas tecnologías utilizan blancos de molibdeno 100 ($Mo\ 100$). Un acelerador lineal se puede usar para producir $Mo\ 99$ mediante la transmutación de $Mo\ 100$ enriquecido, mientras que los ciclotrones se pueden emplear para producir $Tc\ 99m$ directamente por irradiación de $Mo\ 100$. Las tecnologías presentan la importante ventaja ambiental y económica de generar pocos desechos y los proyectos han demostrado ser eficientes en el 90 % de los casos con respecto al reciclaje de $Mo\ 100$.

F.2. Radionucleidos y radiofármacos novedosos

160. En la presente sección se describen las prometedoras aplicaciones de algunos radiofármacos descubiertos recientemente para el diagnóstico y el tratamiento del cáncer.

F.2.1. Galio 68

161. En el área de la tomografía por emisión de positrones (PET), la importancia del radionucleido galio 68 aumenta continuamente, sobre todo debido a su fácil obtención mediante el generador de germanio 68/galio 68. El galio 68 es un emisor puro de positrones, con un período de semidesintegración de 73 minutos. En los últimos años se han descrito, en diversas monografías, algunos radiofármacos de galio 68 basados en péptidos análogos de la somatostatina que ya están reconocidos como agentes de diagnósticos válidos para los tumores neuroendocrinos (TNE). Aunque esta categoría de trazadores de TNE es, por ahora, el único ejemplo de radiofármaco de galio 68 clínicamente aceptado, hay numerosos estudios sobre el desarrollo de nuevos agentes para el diagnóstico de otros tipos de cáncer. Por ejemplo, recientemente se ha descrito un trazador para la obtención de imágenes de tumores de la próstata. La estructura de este radiofármaco es particularmente simple. Se compone de un ión de galio 68 unido a un ligando que contiene un inhibidor del antígeno prostático específico de membrana (PSMA). Este nuevo ligando que interactúa con el PSMA se investigó inicialmente en combinación con el radionucleido tecnecio 99m, y luego se modificó para preparar el correspondiente derivado con galio 68. Varios ensayos clínicos en pacientes con tumores de próstata que se están realizando para demostrar plenamente la eficacia y sensibilidad diagnósticas de este nuevo radiofármaco han dado resultados sumamente prometedores. Los datos disponibles apuntan con claridad a que este nuevo agente puede detectar las recidivas y metástasis del cáncer de próstata con un contraste considerablemente mejor que el de la colina marcada con flúor 18, el trazador convencional empleado comúnmente en la imagenología de tumores de próstata.

F.2.2. Cobre 64

162. Debido a la complejidad del sistema biológico humano, no es fácil encontrar radiofármacos de diagnóstico y terapia nuevos y eficaces. Sin embargo, a veces se producen hallazgos inesperados, como ocurrió con el descubrimiento de que el cobre 64, en su forma química más simple de iones de cobre (II), se acumula cuantitativamente en una serie de tumores, como los cánceres de próstata, de mama y del cerebro y los melanomas. Es posible hacer llegar iones simples de cobre 64 selectivamente a las células cancerosas sin necesidad de vincularlos a un vector biológico.

163. El cobre es un elemento traza esencial que es necesario para la actividad de varias metaloenzimas. Una serie de anomalías de los tejidos y estados patológicos del ser humano han sido asociados con reducciones o elevaciones de los niveles de cobre. Los niveles séricos de cobre son altos en los pacientes con cáncer, y se correlacionan con la gravedad de la enfermedad y la respuesta a las terapias. Pruebas experimentales demuestran que los niveles de cobre biodisponibles modulan el crecimiento tumoral, aunque los mecanismos moleculares y celulares por los que los iones de cobre modulan la tumorigénesis en los diferentes tipos de cáncer todavía no están claros³². Debido a esta función esencial que desempeñan en la replicación de las células cancerosas, los iones de cobre se acumulan en estas células dentro del núcleo, en estrecho contacto con el material genético, mientras que en las células normales se almacenan en el citoplasma. Puesto que el cobre 64 se desintegra emitiendo simultáneamente partículas β^+ and β^- con una vida media de 12,7 horas, podría utilizarse como radionucleido diagnóstico y terapéutico aprovechando su mayor absorción en los tumores. Este uso dual del mismo radionucleido

³² Ishida S., Andreux P., Poitry-Yamatec C., Auwerx J., Hanahana D. (2013) Bioavailable copper modulates oxidative phosphorylation and growth of tumors, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. vol 110 no. 48. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110.

es un ejemplo perfecto del concepto “tratanóstico”³³, en el que se combinan propiedades terapéuticas y de diagnóstico en un mismo agente. El cobre 64 puede producirse fácilmente en un ciclotrón médico convencional de baja energía irradiando un blanco sólido de níquel 64 con protones. Recientemente se han aprobado soluciones acuosas estériles de sal de cloruro de cobre 64 como precursores farmacéuticos para la preparación de radiofármacos de cobre 64. Tras el descubrimiento de una concentración selectiva inesperada de los iones de cobre 64 en las células cancerosas, esas soluciones se están empleando ahora en diversos ensayos clínicos destinados a evaluar la eficacia tanto diagnóstica como terapéutica del cloruro de cobre 64 para el tratamiento de diferentes tipos de tumores y, en particular, del melanoma, el cáncer de mama y el carcinoma prostático.

F.2.3. Circonio 89

164. El uso de anticuerpos radiomarcados como sondas imagenológicas para visualizar tumores ha sido siempre un área prometedora en la imagenología molecular. En particular, la PET con anticuerpos monoclonales (AcM) radiomarcados es un método atractivo para la detección no invasiva y la planificación del tratamiento de tumores. De los radionucleidos comúnmente utilizados en las PET, solo algunos son adecuados para el marcado de anticuerpos, porque en la imagenología con anticuerpos es necesario que el radioisótopo se adhiera al AcM con una buena estabilidad *in vivo*, y su período de semidesintegración debería ajustarse a la farmacocinética del AcM. Actualmente, el radioisótopo circonio 89 está despertando mucho interés como marcador de anticuerpos, porque su período de semidesintegración radiactiva de 3,3 días es compatible con el tiempo necesario para que los AcM intactos alcancen relaciones tumor/fondo óptimas (por lo general, algunos días).

165. El circonio 89 decae por emisión de positrones y captura electrónica, y la energía máxima de su emisión de positrones produce imágenes de PET con buena resolución espacial. El circonio 89 se puede producir en un ciclotrón médico por bombardeo de una lámina de itrio natural de bajo costo, montada en un disco de aluminio/cobre, con un haz de protones de 14 a 14,5 MeV de energía.

166. A la fecha se han marcado con circonio 89 una gran variedad de AcM y varios de ellos han entrado en la investigación clínica con resultados prometedores. Entre ellos figura el trastuzumab (Herceptin), para las imágenes de los receptores 2 del factor de crecimiento epidérmico humano, el cetuximab, para las imágenes de los receptores del factor de crecimiento epidérmico, el bevacizumab, para captar los receptores del factor de crecimiento endotelial vascular, y el MAb J591, para monitorizar los receptores del PSMA.³⁴

³³ El enfoque tratanóstico utiliza una prueba diagnóstica para determinar si un fármaco terapéutico específico puede ser de provecho para el paciente. El entusiasmo actual por el tratanóstico obedece a su enfoque revolucionario que podría permitir una mejor selección de la terapia sobre la base de determinadas características moleculares de la enfermedad, abriendo así nuevas vías para monitorizar objetivamente la respuesta terapéutica. Los aparatos de imagenología aplican métodos que permiten una visualización no invasiva de la fisiología utilizando diversas modalidades para caracterizar la patología anatómica, bioquímica y funcional. La medicina nuclear ha practicado este tipo de procedimiento combinado diagnóstico-terapéutico por decenios, aprovechando el uso inicial del radioyodo, que podría considerarse el primer agente molecular tratanóstico basado en la imagenología. La obtención de imágenes con el yodo 123 emisor de radiación gamma y la terapia combinada con el yodo 131 emisor de partículas β^- ha sido la piedra angular de la terapia adyuvante para los cánceres de tiroides diferenciados. Hay numerosos ejemplos de técnicas moleculares apareadas de imagenología y terapia con radiofármacos que son selectivos para determinados procesos bioquímicos, como la proliferación celular, la síntesis de esteroides, la expresión del receptor del factor de crecimiento, la producción de catecolaminas, la expresión de genes inducida por la hipoxia o la apoptosis. En resumen, el enfoque tratanóstico puede ofrecer un paradigma atractivo para el desarrollo futuro de aplicaciones médicas de radionucleidos, por su capacidad intrínseca de aprovechar la imagenología *in vivo* que puede proporcionar información útil sobre la farmacocinética y la biodistribución de blancos moleculares adecuados para una terapia más fundamental y efectiva.

³⁴Zhang Y1, Hong H, Cai W. (2011), PET tracers based on Zirconium-89. Current Radiopharmaceuticals Apr 4(2):131-9.

F.2.4. Emisores alfa

167. Recientemente, una solución de dicloruro de radio 223 de calidad farmacéutica (el medicamento Xofigo producido por Bayer) fue el primer radiofármaco emisor de partículas α en ser aprobado para el uso clínico en el tratamiento de la enfermedad metastásica ósea. Otros radionucleidos emisores alfa que revisten interés médico y que están disponibles para su posible aplicación terapéutica son el ástato 211, el bismuto 212, el bismuto 213, el actinio 225, el radio 223, el plomo 212, el torio 227 y el terbio 149. Las tecnologías para la producción de estos radionucleidos abarcan desde reactores nucleares hasta ciclotrones y sistemas generadores. Se está trabajando en el desarrollo de métodos más sencillos y eficientes para producir radionucleidos emisores de partículas alfa, a fin de que se disponga ampliamente de ellos para la investigación. Otro aspecto clave de la investigación sobre la terapia con partículas alfa es la necesidad de establecer procedimientos químicos eficientes para ligar el radionucleido emisor alfa con una molécula vectora seleccionada. De hecho, a diferencia de las partículas β^- más livianas, las partículas alfa, por su carácter masivo, podrían tener un impacto mayor en la estabilidad del radioconjugado resultante en solución, lo que indicaría la necesidad de aplicar enfoques químicos robustos para lograr una estabilización satisfactoria.

G. Los isótopos en los estudios del clima y la hidrología: novedades y tendencias recientes

168. El agua es un recurso de importancia crítica para el desarrollo sostenible, ya que su disponibilidad influye en casi todos los sectores de la actividad social y económica. La necesidad de garantizar el acceso a agua potable salubre, así como a un abastecimiento adecuado de agua dulce para el saneamiento, la producción de alimentos y la generación de energía, sigue siendo un reto para muchos países, que afecta a la vida de miles de millones de personas. Sin embargo, no es mucho lo que se sabe sobre las variaciones en la disponibilidad de agua dulce, y las estimaciones de la cantidad total de agua disponible en los ríos, lagos y acuíferos, así como de su almacenamiento y flujo, varían. Se prevé que el cambio climático afectará a los ciclos hidrológicos locales y regionales, creando la necesidad de una mejor determinación de los recursos disponibles a diferentes escalas temporales y espaciales. Se precisa información hidrológica fiable, a fin de adoptar políticas acertadas para la gestión eficaz de los suministros de agua a la luz del cambio climático y de la reducción de la disponibilidad de agua per cápita.

169. La determinación y la gestión de los recursos hídricos requieren enfoques multidisciplinarios y de base científica, que se fundamenten en las ciencias físicas y sociales, fuertemente respaldadas con datos científicos sobre la existencia de aguas superficiales y subterráneas, su distribución y su desplazamiento. Los isótopos estables y radiactivos naturalmente presentes en el agua y sus constituyentes disueltos ofrecen un medio poderoso para seguir el rastro de los procesos del ciclo hidrológico, con inclusión del origen y recorrido del agua de lluvia y de fusión de la nieve que fluye hacia los acuíferos, los lagos y los ríos y de las interacciones hidráulicas entre esas masas de agua. Las “marcas” isotópicas del agua permiten determinar los recursos hídricos de forma rápida y eficaz en relación con el costo, contribuyendo así a su gestión, y demuestran que el agua influye en el cambio climático y se ve afectada por él.

G.1. El ciclo hidrológico y el cambio climático

170. Para evaluar la disponibilidad de agua es imprescindible contar con un buen conocimiento y una adecuada caracterización de los procesos atmosféricos que conducen al cambio climático, junto con una mejor cuantificación de los flujos hídricos dentro del ciclo hidrológico. Los isótopos estables del

agua superficial y de las precipitaciones se utilizan desde hace decenas de años para descifrar y cuantificar los procesos hidrológicos, estudiar la circulación atmosférica, validar los modelos climáticos y simular las condiciones climáticas del presente y el pasado. En un principio, la necesidad de entender la migración de la lluvia radiactiva causada por los ensayos nucleares en los años cincuenta y sesenta permitió obtener un conocimiento sin precedentes de los procesos hidrológicos en la atmósfera. En 1961 se creó la Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación (RMIP), que funciona al amparo del Organismo, en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial, y que proporciona datos isotópicos fundamentales para los estudios de las ciencias atmosféricas, la hidrología y otros campos.

171. Para comprender los efectos del cambio climático en las precipitaciones futuras, es necesario comprender sus efectos en el pasado geológico. Las relaciones isotópicas de las precipitaciones modernas, derivadas de los datos de la RMIP, son el medio más importante de caracterizar los cambios del ciclo hidrológico en los paleoclimas utilizando los archivos ambientales, como el hielo polar y continental, los anillos de crecimiento de los árboles, los sedimentos lacustres y marinos y el agua subterránea. Los avances analíticos recientes han facilitado el acceso a datos sobre los isótopos estables en las precipitaciones y el agua de los ríos, dando lugar al establecimiento de muchas nuevas estaciones de monitorización y facilitando la expansión de la monitorización isotópica a escalas temporales y espaciales más finas. Los instrumentos de rayos láser, más sencillos y baratos y de menor mantenimiento, están contribuyendo enormemente a la expansión de las aplicaciones basadas en isótopos estables, y muchos hidrólogos están empezando a poder realizar sus propias mediciones isotópicas en forma autónoma.

172. Numerosas disciplinas científicas que se ocupan de cuestiones ambientales utilizan isótopos estables como trazadores de las fuentes, los procesos y las interacciones en la naturaleza. Para aumentar aún más la capacidad de detectar y vigilar los efectos del clima en el ciclo hidrológico, el Organismo está creando una red mundial de monitorización de isótopos en el agua fluvial. Juntos, los datos isotópicos de las precipitaciones del presente y del pasado permiten mejorar los modelos del clima mundial utilizados para predecir los efectos del cambio climático en el futuro.

G.2. Evaluación y gestión de los recursos hídricos

173. Para una gestión integrada de los recursos hídricos se necesitan estimaciones más precisas de los recursos de agua disponibles en los ríos y los lagos y del alcance de las interconexiones con el agua subterránea a escala de las cuencas de captación. Aunque los recursos subterráneos aportan actualmente más de la mitad del agua dulce utilizada a nivel mundial, hay poca información fiable sobre el agua subterránea disponible en los acuíferos someros y profundos del planeta. La utilización de isótopos para estimar el origen y la edad del agua subterránea es fundamental, y en algunos casos imprescindible, para la determinación de los recursos de aguas subterráneas y de su renovabilidad. Por muchos años se ha empleado el tritio presente en el agua subterránea como principal trazador hidrológico en el caso de las napas subterráneas de recarga reciente, pero los niveles actuales en esas aguas suelen ser sumamente bajos, lo que dificulta la interpretación cuantitativa. Sin embargo, si las mediciones del tritio se combinan con las del producto de su decaimiento radiactivo, el gas noble helio 3, este conjunto de isótopos ayuda a cuantificar la recarga moderna. Esta información es esencial también para proteger los recursos de aguas subterráneas contra la contaminación.

174. En vista de la escasez de agua, que es un problema no solo en las regiones áridas y semiáridas, deben explorarse nuevas fuentes de agua dulce en acuíferos más profundos. En muchos casos se está extrayendo agua subterránea recargada en el pasado, en condiciones climáticas diferentes, pero es poco lo que se sabe sobre los volúmenes y el flujo de estas aguas profundas, posiblemente fósiles, cuyas edades van desde decenas de miles de años hasta más de un millón de años. En estos acuíferos, la datación isotópica con varios indicadores de edad, principalmente radionucleidos de período largo e isótopos de gases nobles, como el carbono 14, el helio 4 y el kriptón 81, es el único medio de evaluar esos recursos de aguas subterráneas. Si bien el carbono 14 se viene utilizando desde hace decenios como indicador de la edad del agua subterránea, su uso se ve limitado por su período de semidesintegración (de alrededor de 5700 años) y la compleja geoquímica del carbono en muchos acuíferos. Los gases nobles, por ejemplo el kriptón 81, ofrecen ventajas como indicadores de la edad, porque, por su naturaleza químicamente inerte, no interactúan con la matriz geológica del acuífero. Avances analíticos recientes han hecho posible la determinación precisa de unos pocos átomos de esos isótopos raros en aguas subterráneas antiguas, permitiendo la estimación de edades de hasta un millón de años.

G.3. Orientación futura

175. En los últimos años, nuevos enfoques e instrumentos basados en el uso de isótopos, junto con algunos avances analíticos innovadores, han contribuido a ampliar sustancialmente el uso de isótopos ambientales en muchas ciencias naturales, desde las ciencias hidrológicas y atmosféricas hasta la ecología y la paleoclimatología. Estos avances recientes son cruciales para entender, monitorizar y evaluar los efectos del cambio climático en el agua y en otros recursos naturales. Además, la evaluación completa de los recursos hídricos por medios científicos es de importancia decisiva para el desarrollo sostenible. Los instrumentos de rayos láser, más sencillos y baratos y de menor mantenimiento, están contribuyendo enormemente a la expansión de las aplicaciones basadas en isótopos estables, y muchos hidrólogos están empezando a poder realizar sus propias mediciones isotópicas en forma autónoma. Además, se prevé que en el futuro próximo se mantendrá la demanda de los instrumentos isotópicos más nuevos para la datación del agua subterránea, que emplean métodos analíticos más sofisticados para medir isótopos de gases nobles y radionucleidos de período largo.

H. Investigación de los cambios en el medio ambiente marino mediante técnicas nucleares

H.1. Técnicas nucleares para el estudio de los cambios a escala mundial

176. Se están empleando técnicas nucleares para estudiar el CO₂ presente en el medio marino. Los aumentos del CO₂ atmosférico están modificando progresivamente el medio marino, en particular la acidez del agua del mar. Los radionucleidos ofrecen un instrumento poderoso para entender los cambios en el ciclo del carbono y sus efectos en los organismos. También se pueden utilizar para reconstruir los paleocambios en la química del agua del mar, al objeto de comprender los cambios que se están produciendo en el presente y la forma en que pueden afectar a los océanos en el futuro.

177. Los océanos de la Tierra absorben alrededor del 25 % de las emisiones antropógenas de CO₂ y, por lo tanto, contribuyen de manera importante a restringir el crecimiento de las concentraciones atmosféricas de este gas. Posteriormente, la actividad biológica incorpora una fracción de ese CO₂ en partículas de carbono orgánico y carbonato de calcio, que con el tiempo descienden hasta el fondo

marino en un proceso que se conoce como la “bomba biológica”. El radionucleido natural torio 234 permite cuantificar esta tasa de eliminación biológica del CO₂ de la parte superior del océano. La comprensión de la magnitud y velocidad de este proceso es esencial para completar nuestra visión del ciclo del carbono y nos ayudará a encontrar la forma de reducir la acidez de los océanos.

178. Cuando los océanos absorben más CO₂, el agua se acidifica y ello a su vez afecta a los organismos marinos. Mediante el uso de radioisótopos se están investigando las modificaciones en algunos procesos de los organismos marinos, como la calcificación (calcio 45), la biomineralización (estroncio 85), el metabolismo (zinc 65) o la bioacumulación de elementos traza (por ej., cobalto 57, cobalto 60, manganeso 54 o selenio 75), en respuesta a esta creciente acidez. También se está trabajando en la paleorreconstrucción del pH del agua de mar, para lo cual se utiliza la relación isotópica del boro 10 y el boro 11 en los corales masivos de larga vida, que puede luego emplearse en modelos climáticos para estimar los efectos que experimentarán los corales en el futuro.

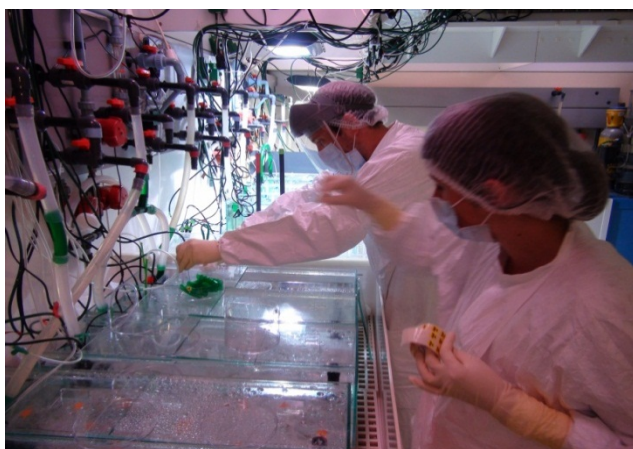


Fig. H-1. Trabajo experimental con radiotrazadores (calcio 45) para comprender los efectos de la acidificación de los océanos en los organismos marinos.

179. El dióxido de carbono y el metano (CH₄) son potentes gases de efecto invernadero que cumplen su ciclo a través de la atmósfera por medio de una variedad de fuentes y sumideros. Estas fuentes y sumideros pueden rastrearse utilizando los marcadores o “huellas” de isótopos estables contenidos en las firmas isotópicas estables del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y el oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de las moléculas de CO₂ and CH₄. En los últimos años se han desarrollado analizadores isotópicos ópticos capaces de realizar las mediciones sumamente precisas y exactas que se necesitan para estudiar los cambios pequeños pero dinámicos del CO₂ y el CH₄ en la atmósfera. Esto solo puede lograrse utilizando mezclas de gases de referencia idóneas del CO₂ o el CH₄ en el aire, calibradas mediante el material de referencia internacional para los isótopos estables proporcionado por el Organismo.

H.2. Técnicas nucleares para el estudio de los cambios ambientales a escala local

180. Una amplia variedad de técnicas nucleares y de isótopos estables permiten estudiar los cambios y los procesos de contaminación del medio ambiente. Esas técnicas son esenciales para reconstruir los episodios de contaminación del pasado, determinar las tendencias de la contaminación y evaluar la eficacia de las medidas de control correspondientes. También se emplean para estudiar las fuentes terrestres de contaminación con nutrientes que causan la eutrofización costera, distinguir entre las concentraciones de contaminantes antropógenas y naturales, determinar las fuentes de contaminantes para los estudios forenses de la contaminación y detectar las biotoxinas relacionadas con floraciones de algas nocivas en los alimentos de origen marino para proteger la salud humana.

181. Los contaminantes persistentes (como los metales pesados y los contaminantes orgánicos) se depositan con frecuencia en los sedimentos marinos de estuarios, zonas costeras y lagunas, que

muchas veces están cerca de áreas urbanas, pesquerías y lugares de recreación. El plomo 210 puede utilizarse para medir las tasas de sedimentación y, por consiguiente, los ritmos a los que se acumulan los contaminantes. Con su período de semidesintegración de 22,3 años, permite construir una geocronología de los últimos 100 a 150 años y vincularla a episodios de contaminación tales como los accidentes o ensayos nucleares o a sucesos relacionados con el medio ambiente, como la eutrofización o las floraciones de algas nocivas.

182. La eutrofización de las aguas costeras relacionada con la actividad humana, que es causada principalmente por la escorrentía de los efluentes urbanos y las tierras agrícolas, es un problema común en muchos estuarios y regiones costeras. Entre los síntomas de degradación figuran las elevadas concentraciones de fitoplancton, la menor transparencia del agua, la reducción del oxígeno disuelto y, en algunos casos, la aparición de floraciones de algas nocivas. Las razones isotópicas de los isótopos estables del nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) se utilizan como indicadores de la eutrofización antropógena en los ecosistemas acuáticos, porque los valores elevados de $\delta^{15}\text{N}$ en la materia orgánica sedimentaria y la biota indican la presencia de descargas antropógenas de nitrógeno en las aguas costeras. Además, puesto que la eutrofización eleva los valores de $\delta^{13}\text{C}$ debido a la mayor producción de fitoplancton marino, el análisis de los isótopos del carbono en compuestos específicos de los biomarcadores lipídicos indica la intensidad de los episodios de eutrofización en las aguas costeras.



Fig. H-2. Espectrómetro de masas de relaciones isotópicas que se utiliza para medir las razones de los isótopos estables del nitrógeno y el carbono en el estudio de los procesos de eutrofización costera.

183. La determinación de las fuentes de contaminantes en el medio marino costero es importante no solo para comprender los procesos de cambio del medio ambiente, sino también para planificar medidas de lucha contra la contaminación. Por lo tanto, las técnicas nucleares que permiten detectar las fuentes de la contaminación son instrumentos valiosos para proteger el medio ambiente y promover la disponibilidad sostenible de los servicios de los ecosistemas.

184. La contaminación de las aguas costeras con petróleo es un problema ambiental en todo el mundo, causado por las descargas operacionales, accidentales o ilegales de estos hidrocarburos. Hay una creciente necesidad de métodos sensibles y fiables para monitorizar la contaminación por petróleo y sus efectos, así como de métodos que permitan determinar el origen de esa contaminación para hacer cumplir la reglamentación. La metodología más desarrollada para caracterizar los derrames de petróleo se basa en el concepto de la huella química, y utiliza la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas para determinar el perfil de una serie de constituyentes del petróleo. Sin embargo, el análisis de las relaciones de los isótopos estables del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en los hidrocarburos del petróleo puede utilizarse también como un instrumento forense adicional para establecer con más precisión la marca isotópica de las mareas negras y encontrar las fuentes del petróleo presente en el medio marino.

185. El plomo es un elemento tóxico no esencial, que puede también rastrearse empleando las razones isotópicas para determinar las diferentes fuentes de contaminación del medio marino. Los yacimientos de menas de plomo tienen normalmente una composición isotópica específica, que refleja la edad, la fuente y los procesos de formación. Las variaciones de las relaciones entre los isótopos estables y radiogénicos del plomo, y especialmente de las relaciones con respecto al único isótopo natural del plomo (el plomo 204), permiten determinar las fuentes y las vías de la contaminación con plomo.



Fig. H-3. Espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente de alta resolución que se utiliza para analizar los isótopos estables del plomo en muestras ambientales.