
Solo para uso oficial

Punto 16 del orden del día provisional
(GC(56)/1 y Add.1)

Examen de la tecnología nuclear — 2012

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a las solicitudes de los Estados Miembros, la Secretaría elabora un amplio Examen de la tecnología nuclear todos los años. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en que se destacan acontecimientos notables ocurridos principalmente en 2011.
- En el Examen de la tecnología nuclear – 2012 se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, fisión avanzada y fusión, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, tecnología nuclear en la alimentación y la agricultura, salud humana, medio ambiente, recursos hídricos, y producción de radioisótopos y tecnología de las radiaciones. En el sitio web del Organismo¹ se pueden consultar otros documentos en inglés relacionados con el Examen de la tecnología nuclear 2012 sobre el desarrollo de alternativas a la irradiación gamma para la técnica de los insectos estériles (TIE); la obtención de imágenes para el diagnóstico y el tratamiento del cáncer de mama, las aplicaciones de la tecnología de las radiaciones en la minería y el procesamiento de minerales, las opciones tecnológicas para la primera central nuclear de un país, el papel de los reactores de investigación en la implantación de la energía nucleoelectrónica, y el uso y gestión de las fuentes radiactivas selladas.
- En el Informe Anual para 2011 (GC(56)/2), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el Informe de Cooperación Técnica para 2011 (GC(56)/INF/4) 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.

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC56/Agenda/index.html>

Examen de la tecnología nuclear — 2012²

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. En 2011, la energía nuclear siguió desempeñando un papel importante en la producción de electricidad a escala mundial pese al accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi. La capacidad de producción de energía nucleoelectrica total fue ligeramente inferior a la de los años anteriores debido a la parada permanente de 13 reactores en 2011, entre ellos ocho en Alemania y cuatro en el Japón tras el accidente. No obstante, se realizaron siete nuevas conexiones a la red frente a cinco en 2010, dos en 2009 y ninguna en 2008. Se sigue previendo un aumento considerable en el uso de la energía nuclear en todo el mundo, de entre el 35% y el 100% hasta 2030, si bien las proyecciones del Organismo para 2030 son entre el 7% y el 8% inferiores a las realizadas en 2010. Los factores que han contribuido a un mayor interés en la energía nucleoelectrica siguieron siendo los mismos: el aumento de la demanda de energía a escala mundial, preocupaciones acerca del cambio climático, la seguridad del suministro de energía y la incertidumbre en relación con las existencias de combustibles fósiles. Se sigue previendo que la mayor parte del crecimiento se dé en países que ya disponen de centrales nucleares en funcionamiento, especialmente en Asia, y que China y la India sigan siendo los principales centros de expansión, mientras que la Federación de Rusia también seguirá siendo un punto de gran crecimiento. La reducción del 7% – 8% del crecimiento proyectado para 2030 es reflejo de la eliminación progresiva acelerada de la energía nucleoelectrica en Alemania, algunas paradas inmediatas y el examen por el Gobierno del Japón de la expansión prevista, así como algunos retrasos temporales en la expansión en varios otros países.

2. Las medidas adoptadas por los países como resultado del accidente nuclear de Fukushima Daiichi han sido diversas. Varios países anunciaron que someterían sus programas a examen, Alemania, Bélgica y Suiza adoptaron medidas adicionales para la eliminación progresiva completa de la energía nucleoelectrica, mientras que otros volvieron a hacer énfasis en sus planes de expansión. Muchos Estados Miembros realizaron evaluaciones de la seguridad a escala nacional en 2011 (a menudo denominadas “pruebas de resistencia”), y se comprometieron a finalizar sin demora cualquier evaluación pendiente y a aplicar las medidas correctoras necesarias. Los países que estudiaban la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica siguieron estando muy interesados en ello. Aunque algunos países indicaron que retrasarían las decisiones de iniciar programas nucleoelectricos, otros siguieron adelante con sus planes de implantación de la energía nuclear.

² A partir del Examen de la tecnología nuclear – 2012, la parte del informe que trata sobre las ciencias y las aplicaciones nucleares se centrará en las esferas temáticas en las que se hayan producido los adelantos más destacados desde los años anteriores. Ante el número reducido de esferas temáticas, las tendencias y novedades importantes se describirán en mayor detalle. Este proceso de prestar mayor atención a temas específicos proseguirá en la versión de 2013 del Examen de la tecnología nuclear.

3. En junio de 2011, el Organismo convocó una Conferencia Ministerial sobre Seguridad Nuclear. Sus objetivos fueron: examinar una evaluación inicial del accidente de Fukushima, estudiar las enseñanzas que debían extraerse, ayudar a iniciar un proceso destinado a mejorar la seguridad nuclear en todo el mundo y analizar formas de fortalecer aún más la respuesta a accidentes y emergencias nucleares. En septiembre de 2011, la Conferencia General aprobó el Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear, en el que se definen 12 medidas principales.

4. En la edición de 2011 del “Libro Rojo” de la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y el OIEA, las estimaciones de los recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, disminuyeron ligeramente en comparación con la edición anterior, ya que la producción mundial de uranio aumentó considerablemente como resultado en gran medida del incremento de la producción en Kazajstán. En 2011 se notificaron nuevos recursos en muchos depósitos de uranio de África, así como el inicio de la producción comercial por primera vez en la mina de lixiviación *in situ* de Honeymoon en Australia. Los precios al contado del uranio, que al final de 2010 habían alcanzado sus niveles más elevados en más de dos años, hasta un máximo de 160 dólares/kg de U, cayeron tras el accidente nuclear de Fukushima Daiichi y al final del año se habían situado en 135 dólares/kg de U.

5. La primera reserva de uranio poco enriquecido (UPE) del mundo bajo los auspicios del Organismo, que comprende 120 toneladas de UPE, fue creada en diciembre de 2010 en el Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio de Angarsk, en la Federación de Rusia. Desde el 3 de febrero de 2011, la reserva de UPE de Angarsk está a disposición de los Estados Miembros del Organismo. Además, en marzo de 2011, la Junta de Gobernadores del OIEA aprobó una propuesta de garantía de combustible nuclear (NFA) presentada por el Reino Unido, patrocinada conjuntamente por los Estados Miembros de la Unión Europea (UE), la Federación de Rusia y los Estados Unidos de América. La NFA tiene por objetivo garantizar el suministro de servicios de enriquecimiento y UPE para su uso en centrales nucleares. Además, durante 2011 la Secretaría siguió trabando en la elaboración de las disposiciones administrativas, financieras, legales y técnicas relativas a un banco de UPE coordinado por el Organismo que sirva de provisión a la que recurrir en última instancia para la generación de energía nucleoelectrónica. El Organismo aceptó una oferta de Kazajstán para acoger el banco en la planta metalúrgica de Ulba, y en 2012 comenzaron las negociaciones oficiales sobre el acuerdo con el Estado anfitrión.

6. En el ámbito de la gestión de desechos radiactivos, el Consejo de la UE aprobó el 19 de julio de 2011 una Directiva que establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible gastado y los desechos radiactivos. En virtud de esta Directiva se adoptó un conjunto de normas armonizadas para todos los Estados Miembros de la UE basadas en las normas del Organismo. En Suecia, la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares SKB presentó en marzo de 2011 una solicitud de licencia para construir una instalación de disposición final para combustible nuclear gastado en Forsmark. En los Estados Unidos de América, la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América publicó en julio de 2011 proyectos de recomendaciones para elaborar una solución a largo plazo en cuanto a la gestión del combustible gastado y los desechos nucleares de los Estados Unidos. El informe final se publicó en enero de 2012.

7. En 2011, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) declararon la erradicación mundial de la peste bovina, que es la infección del ganado más devastadora y que durante siglos ha sido una de las principales causas de la hambruna y la pobreza. Tras la viruela en 1980, ésta es solo la segunda enfermedad que se ha erradicado con éxito. Las técnicas nucleares y conexas contribuyeron a este logro de manera importante mediante el desarrollo y uso de pruebas de diagnóstico como el ensayo inmunosorbente ligado a enzima (ELISA), elaborado por el Laboratorio de Producción Pecuaria y Salud Animal del OIEA.

8. La globalización del comercio de productos alimenticios, junto con el desplazamiento de los animales, ha dado lugar a un incremento sin precedentes de enfermedades y plagas emergentes y reemergentes de los animales y las plantas. En 2011 se hicieron progresos en la utilización de técnicas nucleares para tratar otras enfermedades transfronterizas de los animales, comprendida la gripe aviar (por ejemplo, mediante el rastreo del origen de un brote mediante el uso de isótopos estables). Los científicos también están examinando la posibilidad de utilizar la irradiación para producir vacunas virales para la fiebre aftosa, la fiebre del valle del Rift, la influenza y otros patógenos víricos. En la esterilización de insectos como parte de los programas de control de las plagas de insectos se utilizan tradicionalmente irradiadores de cobalto 60 o cesio 137 que producen radiación ionizante en forma de rayos gamma. No obstante, debido a las crecientes dificultades logísticas asociadas al envío, los científicos están estudiando otras opciones para la esterilización de insectos, como el uso de irradiadores de rayos X y baja energía autónomos.

9. El accidente de Fukushima afectó gravemente a extensas zonas de terrenos agrícolas alrededor del emplazamiento y planteó nuevos desafíos en cuanto a la elaboración de contramedidas agrícolas para hacer frente a la contaminación radiológica. Aunque muchas de las opciones que se utilizaron eficazmente tras accidentes pasados (por ejemplo, en Kyshtym y en Chernóbil), como medidas reparadoras agroquímicas y basadas en los suelos, se siguen probando y aplicando parcialmente en la región de Fukushima, las condiciones específicas de la superficie afectada han requerido la adopción de nuevos enfoques para garantizar la inocuidad de los alimentos y una producción agrícola sostenible.

10. En la esfera de la protección ambiental, el accidente de Fukushima mostró que se debe analizar un número enorme de muestras ambientales con gran rapidez para cumplir los límites reglamentarios y los criterios de calidad. Los métodos rápidos permiten reducir de días o semanas a horas o días el tiempo necesario para el análisis. La validación y puesta en práctica de esos métodos son necesarias, ante todo, en el caso de radionucleidos que entrañan gran preocupación desde el punto de vista radiológico en todos los medios ambientales que podrían verse afectados, así como en los alimentos y los piensos para animales.

11. El empleo de procedimientos de muestreo y análisis bien caracterizados y validados es especialmente importante en el caso de evaluaciones ambientales transfronterizas. El Organismo coordina una red mundial de laboratorios analíticos para mediciones de la radiactividad en el medio ambiente (ALMERA) cuyo objetivo es suministrar análisis fiables y oportunos de muestras ambientales en caso de una emisión accidental o intencionada de radiactividad. El ensayo de aptitud de 2011 organizado por ALMERA se centró en los emisores alfa, beta y gamma presentes en las muestras de suelo y agua. En 2012, la atención se centrará en la calidad y comparabilidad de los análisis de las muestras de aerosoles. En comparación con la espectrometría gamma *in situ* aérea y terrestre para el muestreo ambiental, que es más común, existe la necesidad evidente de instalar dispositivos de monitorización submarina *in situ* del medio marino costero mediante espectrometría gamma de alta resolución con sistemas fijos y móviles. Esto permitirá la reconstrucción de emisiones radiactivas líquidas y la realización de un análisis rápido para detectar contaminación en el agua y los sedimentos.

12. En la esfera de la salud humana, cada vez se reconoce más el hecho de que una nutrición adecuada durante los primeros mil días de vida desde la concepción hasta los dos años de edad puede incidir de gran manera en la capacidad de crecimiento y aprendizaje de un niño, y en el riesgo de contraer enfermedades crónicas, como la diabetes o cardiopatías, en etapas posteriores de la vida. Las técnicas nucleares, como la dilución isotópica estable, ofrecen ventajas para la vigilancia de cambios relativamente pequeños de la composición corporal, y pueden emplearse para evaluar programas de intervención nutricional. En Chile, el éxito del uso de técnicas de isótopos estables para evaluar programas nacionales de intervención permitió elaborar en 2011 un programa sobre el desarrollo motor y de promoción de la actividad física para niños de 6 a 24 meses de edad.

13. Como parte de las actividades destinadas a mejorar la calidad de la gestión de datos para radioterapia, se observa una tendencia creciente a utilizar sistemas de registro y verificación (SRV), que son un tipo de gestión de las bases de datos sobre pacientes de radioterapia. A fin de promover el tratamiento seguro y eficaz de los pacientes, en 2011 el Organismo elaboró directrices para la gestión adecuada de la calidad de los SRV, que todos los suministradores principales de equipo de radioterapia refrendaron. Diversos enfoques en la obtención de imágenes con fines de diagnóstico están desempeñando una función cada vez más importante en la detección y el tratamiento del cáncer de mama. Los adelantos recientes en materia de tecnología de obtención de imágenes sumados a los progresos de la tecnología informática han modificado de manera fundamental los procedimientos para el tratamiento de los tumores y la planificación de la radioterapia. El Organismo, a través de su Programa de acción para la terapia contra el cáncer (PACT), y en cooperación con asociados como la Organización Mundial de la Salud, siguió llevando en 2011 el control integral del cáncer a los Estados Miembros.

14. En el ámbito de los recursos hídricos, las técnicas isotópicas y los instrumentos conexos, junto con nuevos avances en cartografía como los sistemas de información geográfica y los métodos geoestadísticos, están ayudando a los responsables de la gestión del agua a delinear, cuantificar y visualizar mejor los acuíferos y las masas de agua subterránea. En 2011, el uso de dispositivos de bajo costo y fácil funcionamiento para analizar isótopos estables en el agua, sobre la base de la espectroscopia láser, pasó a ser un procedimiento estándar para los grupos de investigación de todo el mundo. Esto les permitió analizar de manera más independiente los isótopos estables con fines de evaluación hidrológica, y de esa forma ahorrar dinero y tiempo. Por ejemplo, los estudios isotópicos para evaluar los recursos de aguas subterráneas en la península de Santa Elena en el Ecuador han aportado información que servido para incrementar la disponibilidad de agua para muchos de los habitantes de la zona.

15. Los avances en la obtención de imágenes en el ámbito nuclear están estrechamente vinculados a la producción de nuevos radionucleidos con nuevas propiedades físicas y químicas. En 2011 aumentó cada vez más la disponibilidad de radionucleidos para tomografías por emisión de positrones (PET) producidos por generadores en países como Alemania, Australia, China, Estados Unidos de América, Francia, India, Japón, Reino Unido y República de Corea, ya que pueden producirse en hospitales sin ciclotrones *in situ*. Otra tendencia observada en 2011 es que varios fabricantes mejoraron sus sistemas de ciclotrón para lograr un aumento de la corriente del haz y energías más altas con el fin de satisfacer la demanda actual de los radionucleidos que se utilizan en técnicas de diagnóstico como la PET y la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT), así como en aplicaciones terapéuticas.

16. En la esfera de las tecnologías de irradiación, en la Reunión Internacional sobre tratamiento por irradiación celebrada en 2011 se informó del desarrollo de una vacuna altamente eficaz contra el paludismo que se encuentra en fases avanzadas de los ensayos clínicos. La vacuna se basa en esporozoitos que han sido atenuados por irradiación gamma, e impide la fase de infección sanguínea de la malaria, protege a la persona de la enfermedad y bloquea la transmisión de ésta.

17. Con respecto a otra novedad de 2011 relacionada con los biocombustibles, se demostró que la hidrólisis térmica combinada con la irradiación por haces de electrones del bagazo de la caña de azúcar aumenta los rendimientos del bioetanol. Se logró demostrar con éxito que las membranas poliméricas fibrosas obtenidas por injerto radioinducido desarrolladas por la Dirección Científica de Haces Cuánticos del Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) permiten eliminar selectivamente el cesio radiactivo en dos emplazamientos que resultaron contaminados a causa del accidente de Fukushima. Los radiotrazadores y las sondas nucleónicas se utilizan cada vez más en las actividades de extracción, principalmente para la prospección y explotación eficaz de los recursos naturales.

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. En 2011, la energía nuclear siguió desempeñando un papel importante en la producción de electricidad a escala mundial. A 31 de diciembre de 2011, había en funcionamiento 435 reactores nucleares de potencia en todo el mundo, con una capacidad total de casi 369 GW(e)³ (véase el cuadro A-1). Esto representa una disminución de la capacidad total de unos 7 GW(e) frente a la capacidad total registrada a finales de 2010, lo que puede atribuirse principalmente a un número mayor de paradas permanentes que de conexiones a la red. Las nuevas conexiones a la red fueron: Ling Ao-4 (1 000 MW(e)), Qinshan-2-4 (610 MW(e)) y el Reactor Experimental Rápido de China (CEFR) (20 MW(e)) en China; Kaiga-4 (202 MW(e)) en la India; Bushehr-1 (915 MW(e)) en la República Islámica del Irán; Chasnupp-2 (300 MW(e)) en el Pakistán; y Kalinin-4 (950 MW(e)) en la Federación de Rusia.

2. El accidente de la central nuclear de Fukushima-Daiichi incidió en el número total de inicios de construcciones de reactores nuevos en 2011. El aumento constante registrado desde 2003, que alcanzó un pico de 16 construcciones iniciadas en 2010, se interrumpió en 2011, cuando se inició la construcción de solo cuatro centrales nucleares: Chasnupp-3 y -4 en el Pakistán, y Rajasthan-7 y -8 en la India.

3. En 2011 se declaró oficialmente la parada permanente de 13 reactores, entre los que figuran no solo las unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima-Daiichi en el Japón, sino también Biblis A y B, Brunsbüttel, Isar-I, Krümmel, Neckarwestheim-1, Philippsburg-1 y Unterweser en Alemania. Oldbury A2 en el Reino Unido también fue puesto en régimen de parada debido a la edad del reactor. Esto representa el número más elevado de paradas desde 1990, cuando el accidente de Chernóbil tuvo un efecto similar. A modo de comparación, en 2010 solo hubo una parada y en 2009 tres.

4. A 31 de diciembre de 2011, había 65 reactores en construcción. Esta cifra, aunque inferior a la del año anterior, sigue siendo muy elevada. Además, como en años anteriores, la expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguen centradas en Asia (véase el cuadro A-1). De hecho, del número total de reactores en construcción, no menos de 44 están en Asia, así como 35 de los últimos 45 reactores nuevos que se han conectado a la red.

5. Pese al accidente de Fukushima-Daiichi, la reciente tendencia a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de numerosos reactores en funcionamiento se mantuvo en 2011 en muchos países. En el Canadá, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN) concedió una renovación de cinco años de la licencia de explotación de Gentile-2 en Quebec. En Finlandia, la compañía eléctrica finlandesa Teollisuuden Voima Oyj (TVO) finalizó en 2011 la última de una serie de renovaciones en la unidad 2 de la central nuclear de Olkiluoto, lo que ha aumentado la capacidad del reactor (860 MW(e)) en 20 MW(e). Dichas renovaciones han elevado la potencia total de Olkiluoto-2 a 880 MW(e), lo que supone un incremento de un tercio con respecto a su potencia inicial de 660 MW(e). En Francia, la Autoridad de Seguridad Nuclear (Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN) aprobó la prolongación de la vida útil por otros diez años de la central nuclear de Fessenheim-1. En México, a principios del año se logró aumentar la capacidad de dos reactores del país en un 20% tras la conclusión de un proyecto de modernización de cuatro años. En España, el Consejo de Seguridad

³ Un GW(e) equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

Nuclear (CSN) aprobó una prórroga de licencia de explotación de diez años para la central nuclear de Cofrentes y las dos unidades de la central nuclear de Ascó. Además, se aumentó la potencia de los dos reactores de la central nuclear de Almaraz en 70 MW(e). En Eslovaquia, la compañía eléctrica Slovenské elektrárne (SE) finalizó el programa de modernización y aumento de la potencia de la dos unidades de la central nuclear de Bohunice. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) renovó las licencias de explotación por 20 años más de: Vermont Yankee; Prairie Island-1 y -2; Kewaunee; Palo Verde-1, -2 y -3; Salem-1 y -2 y Hope Creek. De este modo, el número total de renovaciones de licencias aprobadas en los Estados Unidos de América asciende a 71 desde 2000. Actualmente se están examinando 15 solicitudes de renovación de licencias. Además, en 2011 la NRC de los Estados Unidos aprobó cinco solicitudes de aumento de la potencia y actualmente hay 20 en curso de examen. Por último, en octubre de 2011 se anunció la primera selección de un emplazamiento para una nueva central nuclear tras el accidente del reactor nuclear de Fukushima-Daiichi, cuando Fennovoima seleccionó el municipio de Pyhäjoki en Finlandia como el emplazamiento de la tercera central nuclear del país.

6. Las medidas adoptadas por los países de todo el mundo como resultado del accidente de Fukushima Daiichi han sido diversas. Varios países anunciaron que someterían sus programas nucleoelectricos a examen, algunos adoptaron medidas para la eliminación progresiva de la energía nucleoelectrica de forma completa, mientras que otros reafirmaron su intención de ampliar los programas de que ya disponen. Si bien no modificó la política de países como China, la Federación de Rusia y la India, principales impulsores de la expansión mundial de la energía nucleoelectrica, el accidente planteó interrogantes sobre el papel de la energía atómica en el futuro en algunos países. En Bélgica, en octubre de 2011 se confirmó nuevamente la decisión adoptada en 2003 y reexaminada en 2009 de someter en 2015 los reactores nucleares de potencia más antiguos del país a régimen de parada, y el Gobierno propuso duplicar el impuesto especial sobre la energía nucleoelectrica que paga cada año la industria nuclear. En Francia, el papel de la energía nucleoelectrica en el futuro fue objeto de un intenso debate. En Alemania, el Gobierno aprobó en junio de 2011 un conjunto de medidas legislativas conducentes al cierre permanente de los reactores nucleares de Alemania mediante una eliminación gradual que concluirá hacia fines de 2022. Además, en agosto de 2011 se declaró la parada permanente de las ocho unidades de reactor más antiguas de Alemania. Italia, país que está examinando la posibilidad de reactivar su programa nucleoelectrico tras la parada en 1990 de su última central en explotación, determinó, tras un referéndum celebrado en junio de 2011, que la energía nuclear ya no sería una opción en los próximos cinco años, como mínimo, o más. En el Japón, el Consejo de Energía y Medio Ambiente anunció en julio de 2011 su intención de lograr que el país dependa menos de la energía nucleoelectrica. Esto quedó confirmado en un Libro Blanco publicado por el Gobierno del Japón en octubre de 2011, en que se anunció que se reduciría en la mayor medida posible la dependencia de la energía nuclear en el futuro a mediano y largo plazo y que se elaboraría una nueva política energética. A finales de noviembre de 2011, estaba en funcionamiento menos del 20% de la capacidad de generación de energía nucleoelectrica del Japón. En Suiza, el Senado votó en septiembre de 2011 a favor de aprobar una moción de eliminación progresiva de la energía nucleoelectrica para 2034. Se prevé celebrar un referéndum público sobre la cuestión antes de que la decisión sea definitiva.⁴

7. No obstante, pese a estos acontecimientos recientes, la energía nucleoelectrica sigue siendo una opción importante no solo para los países que ya disponen de programas nucleoelectricos, sino también para los países en desarrollo con necesidades crecientes de energía. Mientras algunos países han señalado que aplazarán sus decisiones de iniciar o no programas nucleoelectricos, otros prosiguen con sus planes de implantar la energía nuclear, incorporando las enseñanzas que se extraigan del

⁴ Además, Taiwán (China) anunció en noviembre de 2011 una nueva política de energía nuclear por la que se eliminaría progresivamente la energía nucleoelectrica, aunque no se ha descrito un calendario específico.

accidente de Fukushima-Daiichi a medida que vayan surgiendo. La República Islámica del Irán puso en servicio su primera central nuclear en septiembre de 2011. Varios países adoptaron en 2011 medidas concretas para construir sus primeras centrales nucleares. Los Emiratos Árabes Unidos y Turquía están haciendo progresos en la aplicación de sus programas gracias a proveedores de la República de Corea y la Federación de Rusia, respectivamente. En octubre de 2011, Belarús firmó un contrato para la construcción de dos reactores nucleares de potencia con Atomstroyexport (ASE), de Rusia. En noviembre de 2011, Bangladesh firmó un acuerdo intergubernamental con Rusia sobre el suministro de dos reactores de 1 000 MW(e) así como sobre el suministro de combustible, la aceptación de la devolución de combustible gastado, la capacitación y otros servicios. También en Noviembre, Viet Nam firmó un acuerdo de préstamo con la Federación de Rusia relativo a la financiación de la primera central nuclear de Viet Nam.

8. En 2011, el Organismo llevó a cabo misiones de Examen integrado de la infraestructura nuclear (INIR) en Bangladesh y en los Emiratos Árabes Unidos. El Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear, aprobado por la Conferencia General en septiembre de 2011, también alienta a los países que se incorporan al ámbito nuclear a integrar las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima-Daiichi en la planificación de sus infraestructuras, y a invitar a que se presten servicios de examen, como las misiones INIR, antes de que pongan en servicio sus primeras centrales nucleares. A lo largo de 2011, el Organismo siguió ofreciendo a los Estados Miembros una amplia gama de servicios de asistencia y apoyo que incluyen orientación y normas, asistencia técnica, servicios de examen, capacitación, creación de capacidad y redes de conocimientos, y muchos de esos servicios se están revisando para que incorporen las enseñanzas extraídas de Fukushima. A medida que unos pocos países hacen progresos en la aplicación de sus planes y se esfuerzan por convertirse en “clientes informados”, la asistencia del Organismo, especialmente a nuevas entidades propietarias/explotadoras, va en aumento.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2011)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2011		Experiencia operacional total hasta 2011	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	9	12 068			102,3	17,8	782	9
ARGENTINA	2	935	1	692	5,9	5,0	66	7
ARMENIA	1	375			2,4	33,2	37	8
BÉLGICA	7	5 927			45,9	54,0	247	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	14,8	3,2	41	3
BULGARIA	2	1 906	2	1 906	15,3	32,6	151	3
CANADÁ	18	12 604			88,3	15,3	618	2
CHINA	16	11 816	26	26 620	82,6	1,9	125	6
COREA, REPÚBLICA DE	21	18 751	5	5 560	147,8	34,6	381	1
ESLOVAQUIA	4	1 816	2	782	14,3	54,0	140	7
ESLOVENIA	1	688			5,9	41,7	30	3
ESPAÑA	8	7 567			55,1	19,5	285	6
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	101 465	1	1 165	790,4	19,3	3707	11
FEDERACIÓN DE RUSIA	33	23 643	10	8 188	162,0	17,6	1058	4
FINLANDIA	4	2 736	1	1 600	22,3	31,6	131	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 600	423,5	77,7	1816	4
HUNGRÍA	4	1 889			14,7	43,3	106	2
INDIA	20	4 391	7	4 824	29,0	3,7	357	3
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DE	1	915			0,1		0	4
JAPÓN	50	44 215	2	2 650	156,2	18,1	1546	4
MÉXICO	2	1 300			9,3	3,6	39	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,9	3,6	67	0
PAKISTÁN	3	725	2	630	3,8	3,8	52	8
REINO UNIDO	18	9 953			62,7	78	1495	2
REPÚBLICA CHECA	6	3 766			26,7	33,0	122	10
RUMANIA	2	1 300			10,8	19,0	19	11
SUDÁFRICA	2	1 830			12,9	5,2	54	3
SUECIA	10	9 326			58,1	39,6	392	6
SUIZA	5	3 263			25,7	40,9	184	11
UCRANIA	15	13 107	2	1900	84,9	47,2	398	6
Total ^{b,c}	435	368 791	65	61 962	2 518,0	12,3% ^d	14 792	3

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

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

6 unidades, 50184 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e) en construcción;

40,37 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 19,02% del total de electricidad generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años), Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (176 años y 1 mes).

d. Representa el porcentaje *global* de energía nuclear suministrada en 2011.

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

9. El Organismo publica anualmente dos proyecciones actualizadas, una baja y otra alta, sobre el crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. Las actualizaciones de 2011 tienen en cuenta los efectos del accidente de Fukushima-Daiichi. En las actualizaciones de 2011, la capacidad nucleoelectrica mundial proyectada para 2030 es un 7–8% inferior a la proyectada antes del accidente. Por tanto, a escala mundial, se prevé que el accidente ralentice o retrase el crecimiento de la energía nucleoelectrica, pero no que invierta esa tendencia. En la proyección baja actualizada, la capacidad nucleoelectrica instalada mundial aumenta desde los 367 gigavatios (GW(e)) actuales hasta 501 GW(e) en 2030, lo que representa una reducción del 8% respecto de lo proyectado el año pasado. En la proyección alta actualizada, la capacidad aumenta hasta los 746 GW(e) en 2030, lo que significa un descenso del 7% respecto de la proyección del año pasado. Sin embargo, el número de reactores nucleares en funcionamiento en 2030 aumentaría previsiblemente en unos 90 en la proyección baja y en unos 350 en la alta, desde el total de 435 reactores existentes a finales de 2010. Se prevé que la mayor parte de este aumento tenga lugar en países que ya tienen centrales nucleares en funcionamiento.

10. Como en años anteriores, las proyecciones indican que el mayor crecimiento se producirá en el Lejano Oriente. La capacidad aumenta desde los 81 GW(e) de finales de 2010, hasta 180 GW(e) en 2030 en la proyección baja, y 255 GW(e), en la alta. Sin embargo, estos niveles son inferiores en 17 GW(e) y 12 GW(e), respectivamente, a los proyectados el año pasado.

11. Europa occidental muestra la mayor diferencia entre las proyecciones baja y alta. En la proyección baja, la capacidad nucleoelectrica de la región se reduce desde los 123 GW(e) de finales de 2010 hasta 83 GW(e) en 2030. En la proyección alta, la energía nucleoelectrica aumenta hasta 141 GW(e), aunque aún es 17 GW(e) inferior al crecimiento previsto el año pasado. En América del Norte, la proyección baja prevé un pequeño descenso, desde los 114 GW(e) de finales de 2010 hasta 111 GW(e) en 2030. La proyección alta estima un incremento hasta la cifra de 149 GW(e), que todavía es 17 GW(e) inferior a la proyección del año pasado.

12. Otras regiones con programas nucleoelectricos importantes son Europa oriental (comprendida la Federación de Rusia), el Oriente Medio y Asia meridional (comprendidos la India y el Pakistán). Según las proyecciones baja y alta, la energía nucleoelectrica crece en estas regiones hasta niveles solo ligeramente inferiores a los proyectados el año pasado. Esto también se aplica a África, América Latina y el Sudeste de Asia, que tienen programas más pequeños.

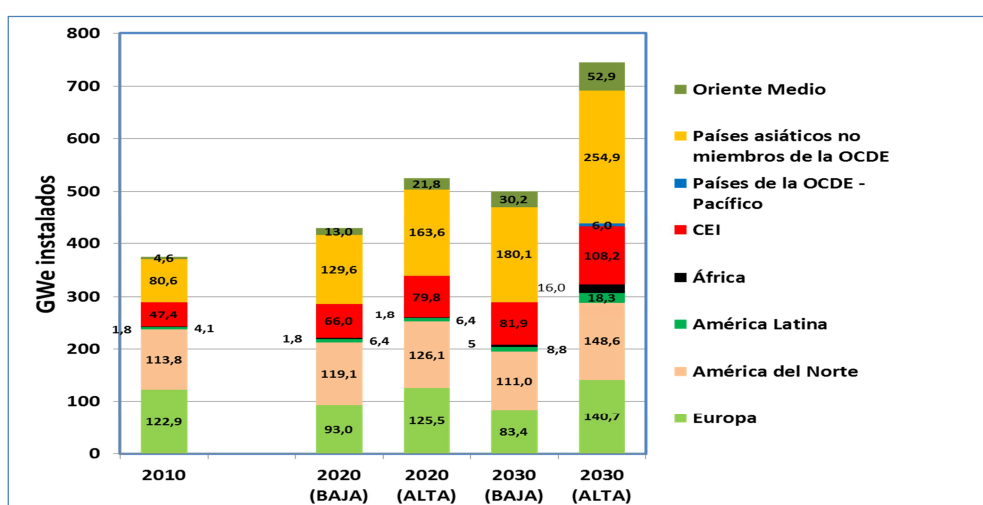


Fig. A-1. Evolución de las capacidades regionales de generación nuclear en 2010–2030, proyecciones bajas y altas del OIEA para 2011.

13. La proyección baja del Organismo parte del supuesto de que las tendencias actuales se mantendrán y que habrá pocos cambios en las políticas que afectan a la energía nucleoelectrica. Sin embargo, no necesariamente presupone que todos los objetivos nacionales en materia de energía nucleoelectrica vayan a alcanzarse. Se trata de una proyección conservadora pero plausible. La proyección alta parte del supuesto de que las actuales crisis financiera y económica serán superadas relativamente pronto y que las anteriores tasas de crecimiento económico y la demanda de electricidad se recuperarán, principalmente en el Lejano Oriente. Asimismo, en la proyección alta se presuponen políticas estrictas a escala mundial para mitigar el cambio climático.

14. El continuado crecimiento previsto en las proyecciones tanto baja como alta sugiere que los factores que contribuyeron al aumento del interés por la energía nucleoelectrica antes del accidente en la central de Fukushima Daiichi no han cambiado. Se trata, entre otros, de la creciente demanda mundial de energía, así como de las preocupaciones por el cambio climático, los precios inestables de los combustibles fósiles y la garantía del abastecimiento de energía.

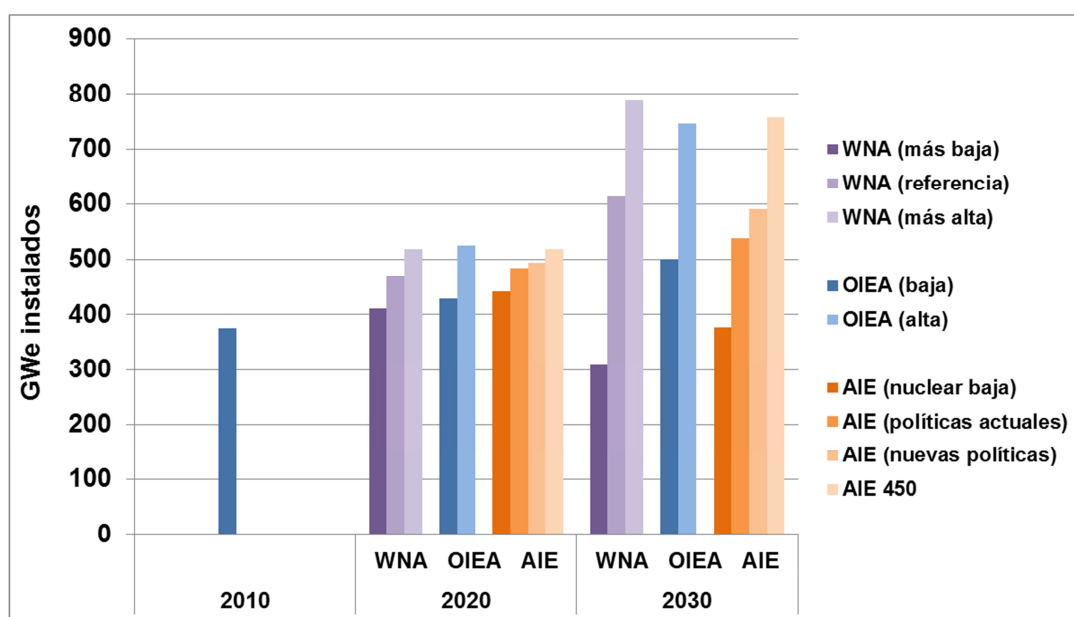


Fig. A-2. Comparación de las proyecciones sobre energía nucleoelectrica del OIEA (azul), la Asociación Nuclear Mundial (WNA) (violeta) y la publicación *World Energy Outlook 2011* de la Agencia Internacional de Energía (AIE) (naranja).

15. La Agencia Internacional de Energía (AIE) de la OCDE también publica proyecciones del crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. La publicación *World Energy Outlook 2011* de la AIE presenta cuatro casos de interés. Aunque el informe principal se centra en tres escenarios, denominados respectivamente “escenario de políticas actuales”, “escenario de nuevas políticas” y “escenario 450” (en el que 450 se refiere a limitar la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero a 450 partes por millón), el accidente de Fukushima-Daiichi llevó a la AIE a estudiar las repercusiones de un alejamiento significativo de la energía nucleoelectrica en un escenario complementario denominado “escenario nuclear bajo”. En el escenario nuclear bajo se partió del supuesto de que no se construirían reactores nuevos en los Estados Miembros de la OCDE, y que fuera de la OCDE solo se construiría la mitad de los reactores nuevos previstos en el escenario de nuevas políticas. También se presupuso que la vida operacional de las centrales nucleares existentes se acortaría. La consiguiente disminución proyectada de la energía nucleoelectrica dio lugar a un modesto incremento de la cuota de electricidad producida a partir de fuentes renovables, así como a importantes aumentos del consumo de carbón y de gas natural, los precios de la energía y las

emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este aumento de las emisiones haría casi imposible mantener el alza de la temperatura media mundial por debajo de los dos grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales, y desencadenaría lo que en climatología se considera actualmente una peligrosa interferencia antropógena en el sistema climático. En la figura A-2 se comparan las proyecciones del Organismo, los escenarios de la AIE, y las proyecciones de la Asociación Nuclear Mundial (WNA).⁵ La proyección baja del OIEA, el escenario de políticas actuales de la AIE y el escenario de referencia de la WNA utilizan supuestos similares en los que nada cambia y ofrecen resultados comparables. Los escenarios altos de las organizaciones también son comparables, como lo son los escenarios nucleares bajos de la AIE y la WNA.

A.3. Ciclo del combustible⁶

A.3.1. Recursos y producción de uranio

16. Cada dos años, el OIEA y la AEN/OCDE publican el denominado “Libro Rojo”, *Uranio: Recursos, Producción y Demanda*. La edición más reciente se publicó en julio de 2012. En la edición de 2011 la cantidad identificada total de recursos de uranio convencionales, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg U, se estimaba en 5,3 millones de toneladas métricas de uranio. Esto representa un 1,4% menos de lo estimado en la edición anterior. Además, se estimaban 1,8 toneladas métricas de recursos de uranio convencionales identificados recuperables a un costo comprendido entre 130 dólares/kg U y 260 dólares/kg U, por lo que el total de recursos identificados recuperables a un costo inferior a 260 dólares/kg U asciende a 7,1 toneladas métricas de uranio. A modo de referencia, el precio al contado del uranio en 2011 fluctuó entre 165 dólares/kg U y 169 dólares/kg U hasta marzo, lo que representó un récord en los dos últimos años, antes de descender hasta 150 dólares/kg U después del accidente de Fukushima-Daiichi. El precio al contado cayó gradualmente hasta 132 dólares/kg U en agosto, aunque a finales del año volvió a escalar hasta los 135 dólares/kg U.

17. Los recursos no descubiertos incluyen tanto los recursos que se prevé que se encuentren en yacimientos conocidos o cerca de ellos, como los recursos más hipotéticos que se considera que existen en zonas geológicamente favorables aún no exploradas. Los recursos totales no descubiertos (recursos pronosticados e hipotéticos) indicados en el Libro Rojo ascendían a más de 10,43 toneladas métricas de uranio, lo que supone un ligero incremento respecto de las 10,40 toneladas métricas notificadas en la edición anterior (publicada en 2010). Los recursos convencionales no descubiertos se estimaron en más 6,2 toneladas métricas de uranio a un costo inferior a 130 dólares/kg U, más otras 0,46 toneladas métricas de uranio a costos que oscilaban entre 130 y 260 dólares/kg U. También se incluían otras 3,7 toneladas métricas de uranio estimadas de recursos hipotéticos para las que no se especificaron los costos de producción.

18. En 2011 se informó de la existencia de nuevos recursos en numerosos depósitos de uranio en África, a saber, Botswana, la República Islámica de Mauritania, Malawi, Malí, Namibia, Zambia y la República Unida de Tanzania, donde las actividades de prospección de uranio siguieron siendo intensas. En la República Unida de Tanzania, el estudio de viabilidad del proyecto del río Mkuju alcanzó una fase avanzada. En Sudamérica también se han notificado recursos adicionales o nuevos en Colombia, Guyana, el Perú y el Paraguay.

⁵ *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2011-2030*, WNA, Londres (2011).

⁶ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas al ciclo del combustible nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2011>), en GovAtom y el sitio web de la Conferencia General y en la dirección www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

19. Los recursos de uranio no convencionales y el torio amplían aún más la base de recursos. Los recursos no convencionales comprenden el uranio potencialmente recuperable asociado a los fosfatos, los minerales no ferrosos, la carbonatita, el esquisto negro y el lignito, así como los recursos de los que el uranio solo se puede recuperar como producto secundario de poca importancia y el uranio presente en el agua de mar. Actualmente muy pocos países notifican sus recursos no convencionales. Las estimaciones actuales acerca del uranio potencialmente recuperable asociado a los fosfatos, los minerales no ferrosos, la carbonatita, el esquisto negro y el lignito son del orden de 8 toneladas métricas de uranio. Uranium Equities Limited (“UEQ”) anunció que está previsto que su planta piloto para la recuperación de uranio a partir de ácido fosfórico mediante una técnica de intercambio iónico comience la producción en mayo de 2012. Si la técnica tiene éxito, se prevé comenzar la producción comercial en torno a 2015.

20. Los recursos mundiales de torio se han estimado en unos seis a siete millones de toneladas. Aunque el torio se ha utilizado como combustible a escala de demostración, aún se requieren trabajos mucho más exhaustivos para poderlo considerar en pie de igualdad con el uranio. En la India, el proceso de selección del emplazamiento del reactor avanzado de agua pesada (AHWR) experimental de 300 MW(e) proyectado, que utiliza combustible de torio, comenzó en 2011. Se espera que el reactor comience a funcionar en 2020. No obstante, no se prevé la plena comercialización del AHWR antes de 2030.

21. En el Libro Rojo se incluyen datos sobre gastos en prospección y explotación de minas a escala mundial únicamente hasta 2010, inclusive, los cuales ascendieron a un total de 2 076 millones de dólares en 2008, lo que supuso un incremento del 22% con respecto a las cifras de 2008 que figuran en la anterior edición del Libro Rojo.

22. En 2010, la producción de uranio en todo el mundo fue superior a 54 670 toneladas, lo que representa un aumento del 6% respecto de las 51 526 toneladas producidas en 2009. Se estima que la producción de uranio en 2011 aumente hasta unas 57 230 toneladas. Australia, el Canadá y Kazajstán representaron el 62% de la producción mundial en 2010, y esos tres países, junto con los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Namibia, el Níger y Uzbekistán, representaron el 92% de la producción total. En Kazajstán, la producción de uranio en 2010 aumentó en más del 27% desde el año anterior, lo que hizo del país, con mucho, y por segundo año consecutivo, el principal productor de uranio del mundo (frente al quinto lugar que ocupaba en 2003 y el segundo, en 2008). Además, se prevé que la producción total de uranio de Kazajstán en 2011 haya aumentado en un 12% en comparación con 2010.

23. En septiembre de 2011, se notificó por primera vez la producción comercial en la mina de lixiviación in situ⁷ de Honeymoon (Australia). Cuando esté plenamente operacional, está previsto que la capacidad de la mina alcance las 400 t U al año (275 t U en 2012). Asimismo, el centro minero de Olympic Dam en Australia meridional obtuvo la aprobación ambiental para su proyecto de expansión, que prevé un nuevo pozo a cielo abierto junto a la mina subterránea existente. El proyecto incrementará la capacidad anual de la mina de las 3 800 t U actuales a 19 000 t U. Asimismo, la mina de uranio de Azelik en el Níger comenzó las operaciones de prueba en diciembre de 2010, con una capacidad total de 700 t U anuales que está previsto que sea alcanzada en 2012.

⁷ En la minería convencional la mena se extrae del suelo y, a continuación, se procesa para obtener los minerales que se buscan. En la lixiviación in situ la mena se deja donde está en el suelo y los minerales se extraen de ella disolviéndolos mediante una solución de lixiviación, que es bombeada a la superficie, donde los minerales podrán ser extraídos de la solución. En consecuencia, la alteración de la superficie es limitada y no se generan colas ni rocas estériles.

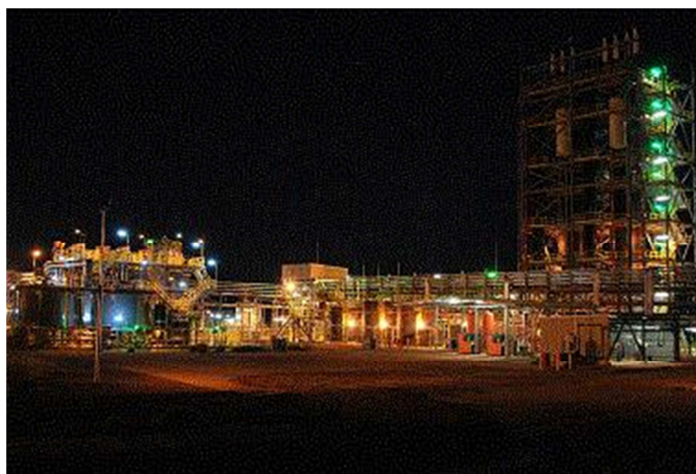


Fig. A-3. Mina de uranio de Honeymoon. Australia comenzó la producción comercial en septiembre de 2011.

24. La producción de uranio en 2010 solo fue suficiente para satisfacer un 85% de las necesidades estimadas de los reactores del mundo, que ascienden a 63 875 t U. Para el resto se utilizaron cinco fuentes secundarias: las reservas militares de uranio natural, las reservas de uranio enriquecido, el uranio reprocesado a partir de combustible gastado, el combustible de mezcla de óxidos (MOX) con uranio 235 parcialmente sustituido por plutonio 239 procedente de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de colas de uranio empobrecido (el uranio empobrecido contiene menos del 0,7% de uranio 235). Al ritmo de consumo estimado para 2010, la duración prevista de las 5,3 toneladas métricas de recursos de uranio convencionales identificados recuperables a menos de 130 dólares/kg U es de unos 80 años, lo cual es positivo si se compara con las reservas de 30 a 50 años correspondientes a otros productos básicos (por ejemplo, el cobre, el zinc, el petróleo y el gas natural).

25. Sobre la base de las proyecciones disponibles en 2010, se proyectó un aumento de las necesidades mundiales anuales de uranio en relación con los reactores de entre 97 645 y 136 835 toneladas en 2035. Actualmente, la capacidad proyectada de producción de uranio de fuentes primarias, que comprende los centros de producción existentes, comprometidos, planificados y posibles, podría satisfacer la demanda mundial de uranio proyectada hasta 2028, tomando el límite superior de este intervalo, o hasta 2035, tomando el límite inferior.

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible

26. Seis países (Canadá, China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia y Reino Unido) tienen en funcionamiento plantas de conversión a escala comercial de octóxido de triuranio (U_3O_8) a hexafluoruro de uranio (UF_6), y en la Argentina, el Japón y el Pakistán se encuentran en funcionamiento instalaciones de conversión en pequeña escala. El proceso de volatilización en seco con fluoruros se utiliza únicamente en los Estados Unidos de América, mientras que todos los demás países que realizan actividades de conversión utilizan un proceso en húmedo. La capacidad de conversión mundial total se mantuvo estable en unas 75 000 toneladas de uranio natural (t U en forma de UF_6) anuales. Sin embargo, se esperan cambios importantes a este respecto en Francia (Comurhex II de Areva) y los Estados Unidos de América (la planta Metropolis Works de Honeywell). La demanda total actual de servicios de conversión (suponiendo una concentración de las colas de enriquecimiento del 0,25% de U 235)⁸ es del orden de 59 000 a 65 000 t U anuales.

⁸ La concentración de las colas, o la concentración de U 235 en la parte empobrecida, determina indirectamente la cantidad de operaciones a las que se debe someter una cantidad determinada de uranio a fin de obtener una concentración dada del producto. Un incremento de la concentración de las colas relacionado con una cantidad fija y una concentración fija de uranio enriquecido reduce la cantidad de enriquecimiento requerida, pero incrementa las necesidades de conversión y de uranio natural, y viceversa. Las concentraciones de las colas pueden variar ampliamente y alterarán la demanda de servicios de enriquecimiento.

27. La capacidad de enriquecimiento mundial total es actualmente de unos 65 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 45 millones de UTS anuales. Hay plantas de conversión a escala comercial en funcionamiento en China (bajo los auspicios de la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC)), los Estados Unidos de América (USEC y URENCO), la Federación de Rusia (Rosatom) y Francia (AREVA). El grupo URENCO tiene plantas de centrifugación en funcionamiento en Alemania, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y el Reino Unido. También hay instalaciones de enriquecimiento en pequeña escala en la Argentina, el Brasil, China, la India, el Japón y el Pakistán.

28. Se encuentra en marcha la labor de desarrollo de dos nuevas instalaciones de enriquecimiento por centrifugación a escala comercial, ambas en los Estados Unidos de América, a saber: la instalación Eagle Rock de AREVA y la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América (ACP). En octubre de 2011, la instalación de enriquecimiento Eagle Rock de AREVA recibió su licencia.

29. La Argentina ha estado realizando actividades de investigación y desarrollo sobre nuevas tecnologías de enriquecimiento, como el enriquecimiento por centrifugación y por láser, y reconstruyendo al mismo tiempo su capacidad de enriquecimiento por difusión gaseosa en Pilcaniyeu.

30. La Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) espera comenzar la explotación comercial de las cascadas de centrifugadoras mejoradas de Rokkasho, prefectura de Aomori, en 2012 y aumentar la capacidad actual de 150 000 UTS anuales a 1,5 millones de UTS anuales hasta 2020. En el marco de un acuerdo concertado entre Rosatom y Toshiba se tiene previsto construir una nueva planta de enriquecimiento en la Japón que utilizará tecnología de centrifugación rusa.

31. En junio de 2011, 46 países miembros del Grupo de Suministradores Nucleares (GSN) llegaron a un acuerdo sobre nuevas disposiciones de intercambio a nivel mundial en materia de comercio en relación con el enriquecimiento de uranio y el reprocesamiento de combustible gastado. De conformidad con las nuevas directrices, los países que desean obtener tecnología nuclear deben cumplir una serie de requisitos, entre ellos: pleno cumplimiento del Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares (TNP), ninguna citación por un regulador nuclear internacional por falta de aplicación de salvaguardias, cumplimiento de los acuerdos de salvaguardias del OIEA y adhesión a las normas de seguridad internacionales.

32. La capacidad total mundial de reconversión en 2011 se mantuvo en unas 60 000 t UF₆ anuales, es decir en el mismo nivel que el alcanzado en 2010 tras la puesta en servicio de tres instalaciones de reconversión, dos en los Estados Unidos de América (en Paducah, Kentucky y Portsmouth, Ohio) y una en la Federación de Rusia (W-ECP en Krasnoyarsk).

33. Existen actualmente varios suministradores de la mayoría de tipos de combustible. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 000 t U anuales (uranio enriquecido en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para reactores de agua ligera (LWR) y en unas 4 000 t U anuales (uranio natural en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para reactores de agua pesada a presión (PHWR). En el caso del combustible de uranio natural para PHWR, el uranio se purifica y se convierte en óxido de uranio (UO₂) en la Argentina, el Canadá, China, la India y Rumania. La demanda anual de servicios de fabricación de combustible para LWR siguió siendo de unas 7 000 toneladas de uranio enriquecido en conjuntos combustibles, pero se prevé que aumentará a unas 9 500 t U anuales en 2020. En el caso de los PHWR, la demanda fue de 3 000 t U anuales. En China se están realizando actividades de ampliación de las instalaciones existentes, y en Kazajistán y Ucrania está prevista la construcción de nuevas instalaciones de fabricación. La instalación de fabricación proyectada en Kazajistán, con una capacidad prevista de 1 200 t U anuales, es una empresa conjunta de AREVA y Kazatomprom y se prevé que esté concluida en 2014.

34. Las operaciones de reciclado proporcionan una fuente secundaria de suministro de combustibles nucleares mediante el uso de uranio reprocesado y combustible de MOX. En Elektrostal, Federación de Rusia, se producen actualmente unas 100 t anuales de uranio reprocesado para AREVA.

Una línea de producción de la planta de AREVA en Romans (Francia) está autorizada para transformar anualmente 150 t de uranio reprocesado en combustible y ya se han suministrado conjuntos combustibles para PWR de este tipo a reactores de Bélgica, Francia y el Reino Unido.

35. La capacidad de fabricación de combustible de MOX actualmente es de unas 250 t de metal pesado; las principales instalaciones se encuentran en Francia, la India y el Reino Unido, con algunas más pequeñas en la Federación de Rusia y el Japón. En el Japón, la JNFL está construyendo una nueva instalación de fabricación de combustible de MOX (130 t HM MOX) en Rokkasho, cuya finalización está prevista para marzo de 2016. En la Federación de Rusia se está construyendo una instalación de fabricación de combustible de MOX para el reactor rápido BN-800 en Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Federación de Rusia también tiene instalaciones piloto en el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad, y en la planta Mayak, en Ozersk. En el Reino Unido, una nueva instalación de fabricación de MOX se añadirá a la planta de MOX de Sellafield para permitir el cumplimiento de nuevos contratos a largo plazo de suministro de MOX. En los Estados Unidos de América se están construyendo más instalaciones de fabricación de combustible de MOX con miras a utilizar el excedente de plutonio apto para armas. A escala mundial, 32 reactores térmicos utilizan actualmente combustible de MOX.

Garantía de suministro

36. La primera reserva de UPE del mundo fue creada, bajo los auspicios del Organismo, en diciembre de 2010 en el Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio de Angarsk, (Federación de Rusia). La reserva de UPE, que comprende 120 toneladas de UPE, de las cuales un tercio tiene un nivel de enriquecimiento del 4,95%, fue verificada por inspectores de salvaguardias del OIEA en diciembre de 2010. Valorada actualmente en más de 300 millones de dólares, la reserva de UPE está a disposición de los Estados Miembros del OIEA que experimenten interrupciones en sus suministros de UPE por razones no relacionadas con aspectos técnicos o comerciales. El OIEA suministrará el UPE a los Estados Miembros que reúnan las condiciones requeridas, a efectos de la generación de energía nucleoelectrónica y a precio de mercado, y los ingresos se utilizarán para reponer la reserva de UPE. La Federación de Rusia sufragará los gastos de almacenamiento del UPE, así como los relacionados con el mantenimiento, la seguridad tecnológica y física, y las salvaguardias. El Acuerdo entre el Gobierno de la Federación de Rusia y el OIEA relativo al establecimiento en el territorio de la Federación de Rusia de una reserva física de UPE y el suministro de UPE de esa reserva al OIEA para sus Estados Miembros, firmado en Viena el 29 de marzo de 2010, entró en vigor el 3 de febrero de 2011. La reserva de UPE de Angarsk ha estado a disposición de los Estados Miembros del OIEA desde esa fecha.

37. En marzo de 2011, la Junta de Gobernadores del OIEA aprobó una propuesta relativa a la garantía del suministro de servicios de enriquecimiento y uranio poco enriquecido para su uso en centrales nucleares (NFA) presentada por el Reino Unido y copatrocinada por los Estados Miembros de la Unión Europea, la Federación de Rusia y los Estados Unidos de América. Se introdujo así un proyecto de “modelo de acuerdo de NFA” por el que el Estado suministrador de UPE o de servicios de enriquecimiento podría no interrumpir el suministro a receptores que cumplan las obligaciones internacionales y la normativa publicada relativa a la concesión de licencias de exportación. Esta propuesta fue presentada originalmente por el Reino Unido en 2007 y perfeccionada en 2009.

38. Además, en diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó el establecimiento de un banco de UPE del OIEA, es decir, una reserva física de UPE que estará bajo la jurisdicción y el control del Organismo. La finalidad de este banco de UPE es servir como mecanismo para respaldar el mercado comercial, pero sin perturbarlo, en caso de que el suministro de UPE de un Estado Miembro se vea interrumpido y no se pueda reanudar por medios comerciales, y a condición de que el Estado de que se trate cumpla las condiciones establecidas por la Junta. En 2011 la Secretaría del OIEA prosiguió la labor de elaboración de las disposiciones administrativas, financieras, jurídicas y técnicas necesarias. En mayo de 2011 el OIEA distribuyó los criterios para seleccionar a un Estado anfitrión que disponga de un emplazamiento adecuado para el banco de UPE del OIEA e invitó a los Estados Miembros a dar

a conocer su interés por acoger el banco. Kazajstán fue el único Estado Miembro que expresó oficialmente su interés, y el Organismo aceptó su oferta para acoger el banco en la planta metalúrgica de Ulba. Las negociaciones oficiales sobre el acuerdo con el Estado anfitrión comenzaron en 2012, y grupos del OIEA visitaron ese año el emplazamiento de Ulba para evaluar en detalle las necesidades relativas a las mejoras de la seguridad tecnológica y la seguridad física. Para el establecimiento del banco de UPE se han recibido promesas de contribuciones por más de 150 millones de dólares de los Estados Miembros, la UE y la Nuclear Threat Initiative (NTI). A fines de 2011 se habían pagado íntegramente las cantidades prometidas por Noruega (5 millones de dólares), los Estados Unidos (alrededor de 50 millones de dólares), y la NTI (50 millones de dólares); la UE había pagado 10 de los 25 millones de euros prometidos y se estaban finalizando acuerdos con Kuwait (10 millones de dólares) y los Emiratos Árabes Unidos (10 millones de dólares).

39. Los derechos de los Estados Miembros, incluido el de crear o ampliar su propia capacidad de producción en la esfera del ciclo del combustible nuclear, se mantendrán intactos y no se verán comprometidos ni reducidos en forma alguna por el establecimiento de mecanismos tales como los mecanismos internacionales de garantía de suministro. Estas nuevas opciones están destinadas a complementar los derechos que existen en la actualidad.

40. En agosto de 2011 también pasó a estar disponible en los Estados Unidos de América el Suministro de combustible garantizado estadounidense, que comprende 230 toneladas de UPE con un enriquecimiento del 4,95%.

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible nuclear

41. En 2011 se descargaron como combustible gastado de todos los reactores nucleares de potencia unas 10 500 t HM. La cantidad total acumulada de combustible gastado que se había descargado en todo el mundo hasta diciembre de 2011 era de unas 350 500 t HM, de las que unas 240 000 t HM se encuentran almacenadas en instalaciones de almacenamiento situadas en el emplazamiento del reactor o fuera del mismo. Menos de un tercio de la cantidad acumulada de combustible gastado descargado en todo el mundo, unas 100 000 t HM, ya ha sido reprocesada. En 2011, la capacidad mundial de reprocesamiento comercial, repartida en cuatro países (Federación de Rusia, Francia, India y Reino Unido), era de unas 4 800 t HM anuales.

42. A mediados de 2011, China había finalizado el ensayo frío de su planta de reprocesamiento piloto de 50 t HM anuales, así como el 5% de los ensayos en caliente (5% de solución de combustible gastado + 95% de solución simulada). Los trabajos de investigación y desarrollo continúan prestando apoyo técnico a las operaciones estables de la planta de reprocesamiento piloto. China también proyecta construir una instalación comercial de reprocesamiento y el proceso de selección del emplazamiento se encuentra en curso. Además, en la central nuclear de Qinshan se han finalizado las actividades de demostración del uso directo de uranio reciclado como combustible en un reactor CANDU. En 2010 y 2011 se irradiaron en la unidad 1 de la central de Qinshan 24 haces de combustible de 37 elementos para CANDU que contenían un equivalente de uranio natural, obtenido mediante la mezcla de uranio reprocesado y empobrecido, y que demostraron un rendimiento adecuado.

43. En la India prosiguen los trabajos de construcción de la instalación del ciclo del combustible para reactores rápidos (FRFCF), de Kalpakkam. La instalación comprende una planta de fabricación y reprocesamiento de combustible, una planta de subensamblaje del núcleo del reactor, una planta de óxido de uranio reprocesado y una planta de gestión de desechos para dar servicio al próximo prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e).

44. En el Japón, los trabajos de construcción de la planta de reprocesamiento comercial de 800 t HM anuales, situada en Rokkasho, estaban a punto de concluirse cuando tuvieron que suspenderse como consecuencia del terremoto y tsunami ocurridos el 11 de marzo de 2011.

A.3.4. Gestión de desechos radiactivos y clausura

45. El inventario mundial de desechos radiactivos declarados como desechos almacenados al final de 2010 (el año más reciente disponible) se situó en aproximadamente 61,4 millones de m³ de desechos de actividad baja e intermedia de período corto (LILW-SL)⁹, 13,9 millones de m³ de desechos de actividad baja e intermedia de período largo (LILW-LL), y 423 000 m³ de desechos de actividad alta (HLW) (véase el cuadro A-2).

Cuadro A-2. Estimación global del inventario de desechos radiactivos correspondiente a 2010 (datos más recientes)¹⁰

Clase de desechos¹¹	Almacenamiento¹² (m ³)	Disposición final acumulada (m ³)
<i>Desechos de actividad baja e intermedia de período corto (LILW-SL)</i>	61 381 000	24 720 000
<i>Desechos de actividad baja e intermedia de período largo (LILW-LL)</i>	13 901 000	625 000
<i>Desechos de actividad alta (HLW)</i>	423 000	4 000

Fuente: NEWMDB (2011), y otras referencias.¹³

46. El total acumulado de desechos radiactivos sometidos a disposición final hasta el final de 2010 era de aproximadamente 24,7 millones de m³ de LILW-SL; 625 000 m³ de LILW-LL; y unos 4 000 m³ de HLW, principalmente de Chernóbil. La baja proporción entre la disposición final y el almacenamiento de LILW-LL y HLW indica la falta en general de capacidad para la disposición final de estas dos clases de desechos en todo el mundo.

47. En todo el mundo están en funcionamiento o en desarrollo instalaciones de disposición final para todas las categorías de desechos radiactivos. Las opciones de disposición final son, entre otras, la disposición final en trincheras de desechos de actividad muy baja (VLLW; Eslovaquia, España, Francia, Suecia), de desechos de materiales radiactivos naturales (NORM) (Malasia, República Árabe Siria) y de

⁹ El aparente aumento de LILW-SL almacenados desde el *Examen de la tecnología nuclear – 2011* se debe a la inclusión de nuevos datos sobre el almacenamiento de desechos radiactivos líquidos de período corto.

¹⁰ Las cifras del cuadro A-2 son estimaciones y no deben tomarse como cantidades exactas de los inventarios de desechos radiactivos que actualmente se gestionan a escala mundial. Además de las posibles discrepancias habituales en las cantidades de material almacenado de un año a otro debido a los cambios de masa y volumen de los derechos durante el proceso de gestión de los desechos, la cantidad total de desechos contabilizados aumenta constantemente a medida que se añaden nuevos Estados Miembros a la Base de datos sobre gestión de desechos en Internet (NEWMDB) del Organismo, y que estos facilitan datos que faltaban, incluidos los correspondientes a años anteriores.

¹¹ El inventario de la NEWMDB se notifica actualmente de acuerdo a las recomendaciones para la clasificación de desechos que figuran en la Guía de Seguridad titulada *Classification of Radioactive Waste* (Colección de Seguridad N° 111-G-1.1, Viena, (1994)). Éstas han sido sustituidas recientemente por un nuevo sistema de clasificación que se presenta en la Guía de Seguridad General titulada *Classification of Radioactive Waste*, (Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSG-1, Viena (2009)). Los datos que figuran en la NEWMDB se están convirtiendo actualmente de acuerdo con lo establecido en el nuevo sistema de clasificación.

¹² Los desechos se someten a tratamiento y acondicionamiento y pasan por varias fases de manipulación antes de su almacenamiento o disposición final. Por consiguiente, la masa y el volumen de los desechos radiactivos cambian constantemente durante el proceso de gestión previa a la disposición final. Esto puede dar lugar a discrepancias en las estimaciones de las cantidades almacenadas de un año a otro.

¹³ Además de la NEWMDB, son fuentes de información los informes nacionales de acceso público presentados en el marco de la Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos, y otros datos publicados.

desechos de actividad baja (LLW) en zonas áridas (Estados Unidos de América, República Islámica del Irán, Sudáfrica); las estructuras construidas cerca de la superficie para LLW (Bélgica, Bulgaria, Eslovaquia, Eslovenia, España, Francia, India, Japón, Lituania, Reino Unido, República Checa, Rumania); la disposición final a profundidades intermedias de desechos de actividad baja e intermedia (LILW; Hungría, Japón, Noruega, República Checa, República de Corea) y desechos NORM (Noruega); la disposición final en pozos barrenados de LLW (Estados Unidos de América) y fuentes radiactivas selladas en desuso (Filipinas, Ghana, Malasia); así como instalaciones geológicas profundas designadas para LILW (Alemania, Estados Unidos de América) y HLW y/o combustible gastado (Finlandia, Francia, Suecia).

48. Bélgica tiene la intención de someter a disposición final desechos de actividad baja y media y período corto en una instalación de disposición final en la superficie en el municipio de Dessel. El Organismo Nacional de Desechos Radiactivos y Materiales Fisionables Enriquecidos (ONDRAF/NIRAS) de Bélgica inició una justificación de la seguridad, que incluye una evaluación del impacto ambiental (EIA) en 2009 que finalizará en 2012. El ONDRAF/NIRAS presentará entonces una solicitud de licencia de construcción y explotación de una instalación cuya puesta en funcionamiento está prevista para 2016.

49. En Bulgaria se inauguró oficialmente en mayo de 2011 una instalación de almacenamiento de combustible gastado en la central nuclear de Kozloduy.

50. En el Canadá, en abril de 2011, Ontario Power Generation (OPG) presentó oficialmente una declaración relativa al impacto ambiental (DIA) y la documentación final de una licencia para preparar un emplazamiento y construir un repositorio geológico profundo para LILW cerca del emplazamiento nuclear de Bruce. Actualmente se está realizando un estudio de viabilidad a fin de evaluar la idoneidad del emplazamiento de los laboratorios de Chalk River (CRL) para acoger una instalación de gestión de desechos geológicos (GWMF), un repositorio a 500 metros de profundidad en el que se prevé aislar y contener LLW y desechos de actividad intermedia (ILW) derivados del emplazamiento de los CRL.

51. En Dinamarca se señalaron seis posibles lugares donde construir un repositorio para los LILW del país en un estudio presentado al Gobierno en mayo de 2011.

52. En Francia, el proyecto Cigéo, para someter a disposición final desechos muy radiactivos, procedentes principalmente de centrales nucleares y del reprocesamiento de su combustible, entrará en su fase de diseño industrial en 2012.

53. En Olkiluoto (Finlandia), la empresa de gestión de desechos nucleares Posiva está construyendo la instalación subterránea de caracterización de rocas ONKALO, en la que se alcanzó la profundidad definitiva para la disposición final en 2010. Posiva tiene previsto presentar la solicitud de licencia de construcción del repositorio para este emplazamiento al Gobierno de Finlandia al final de 2012 y comenzar con la disposición final en 2020.

54. En Ghana, la Comisión de Energía Atómica de Ghana inauguró una instalación de disposición final de desechos radiactivos en Accra destinada al almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y física de fuentes radiactivas que ya no funcionan o que no se necesitan.

55. En Alemania se reiniciaron, en octubre de 2010, las investigaciones en la mina de exploración de Gorleben, un posible emplazamiento para HLW/combustible nuclear gastado, tras una moratoria de diez años. DBE está llevando a cabo esas investigaciones. La empresa también es responsable de la actual reconstrucción de la mina de Konrad con el fin de convertirla en un repositorio nacional para LILW. Esta instalación se encontrará a 1 000 – 1 100 metros por debajo de la superficie y se prevé iniciar las operaciones en 2019. En febrero de 2011 se finalizó el relleno de la parte central de la instalación. BfS, titular de la licencia de repositorio de Morsleben, ha presentado una solicitud de licencia de cierre.

56. La Empresa Pública de Responsabilidad Limitada de Gestión de Desechos Radiactivos (PURAM) de Hungría finalizará en breve la construcción de un repositorio subsuperficial (a unos 200 metros) en Bataapáti para LILW procedente de centrales nucleares. Aunque la zona de almacenamiento en la parte superficial de la instalación ya está en funcionamiento, la puesta en servicio de la disposición final está programada para 2012. Se prevé que en 2012 esté finalizado un complejo de disposición final similar en Gyungju (República de Corea). La parte de almacenamiento de la instalación está en funcionamiento desde diciembre de 2010.

57. En Lituania, el Cuerpo de Inspección Estatal de Seguridad de la Energía Nucleoeléctrica (VATESI) ha expedido una licencia a la central nuclear de Ignalina para la construcción de instalaciones de recuperación y tratamiento previo de desechos radiactivos sólidos.

58. En Rusia se inició en 2003 la construcción de una nueva instalación de almacenamiento en seco de combustible gastado en el complejo químico de extracción de minerales (MCC) de Zheleznogorsk, en la región de Krasnoyarsk. La construcción de la primera fase de la instalación, con una capacidad de combustible gastado de RBMK de 8 100 toneladas, finalizó en diciembre de 2011.

59. El 16 de marzo de 2011, la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB) presentó una solicitud de licencia a las autoridades nacionales para construir una instalación de disposición final para combustible nuclear gastado en Forsmark, en el municipio de Östhammar, y una planta de encapsulamiento en Oskarshamn. Según las estimaciones de SKB, las operaciones que podrían comenzar en 2025.

60. En noviembre de 2011 se inauguró una nueva instalación de disposición final de desechos radiactivos cerca de Andrews County (Texas), en los Estados Unidos de América. Se encarga de su explotación Waste Control Specialists, y se han concedido licencias para colocar LLW de la clase A, B y C en zanjas poco profundas.

61. También en los Estados Unidos de América, la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América, creada en enero de 2010, publicó en julio de 2011 proyectos de recomendaciones para elaborar una solución a largo plazo con miras a gestionar el combustible nuclear gastado y los desechos nucleares de los Estados Unidos.¹⁴ El informe final se publicó en enero de 2012.

62. El Consejo de la Unión Europea (UE) aprobó el 19 de julio de 2011 una Directiva del Consejo (2011/70/EURATOM) para la gestión responsable y segura del combustible gastado y los desechos radiactivos, en cuyo marco se adoptó un conjunto de normas armonizadas para los Estados Miembros de la UE basadas en las normas del OIEA sobre gestión y disposición final de los desechos. La Directiva incluye el requisito de que los Estados Miembros de la UE establezcan y mantengan actualizados programas nacionales que incluyan, entre otras cosas, los conceptos o planes y soluciones técnicas para la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos desde la generación hasta la disposición final. Los Estados Miembros deben notificar sus programas nacionales a la Comisión Europea (CE), así como informarle de la aplicación de la Directiva el 23 de agosto de 2015 a más tardar, y posteriormente cada tres años.

63. La gestión tecnológica y físicamente segura de las fuentes de actividad alta siguen planteando problemas especiales ya que limitaciones importantes, principalmente financieras, impiden su fácil repatriación al final de sus vidas útiles. Se han llevado a cabo con éxito varias operaciones encaminadas a condicionar y retirar fuentes radiactivas selladas en desuso de los locales de los usuarios y someterlas a control ya sea transportándolas a una instalación nacional de almacenamiento de desechos radiactivos o, en algunos casos, retirándolas completamente del país. En Singapur ya no

¹⁴ En el sitio <http://brc.gov/> figura más información al respecto.

hay fuentes de actividad alta en desuso desde septiembre de 2011, momento en que fue retirada la última fuente radiactiva de actividad alta sellada en desuso para su reciclaje. Asimismo, en octubre de 2011 se repatrió a Francia desde Madagascar una fuente de teleterapia de origen francés.

Desechos radiactivos históricos

64. Se está realizando un número importante de actividades para eliminar el legado nuclear de la guerra fría. Desde hace unos quince años, el Grupo de contacto de expertos para proyectos internacionales de gestión de desechos radiactivos en la Federación de Rusia (GCE) del Organismo ha demostrado ser un foro eficaz para el intercambio de información y la coordinación de los programas sobre el legado nuclear en la Federación de Rusia. A finales de 2011, la Federación de Rusia, con una ayuda considerable de los socios del GCE había descargado el combustible de 196 de los 200 submarinos nucleares fuera de servicio y los había desmantelado. Las unidades de reactor de los submarinos de las que se ha descargado el combustible están siendo selladas y colocadas en una instalación de almacenamiento a largo plazo. La retirada en condiciones de seguridad del combustible nuclear gastado y de los desechos de antiguas bases navales es actualmente la prioridad del GCE. Se están creando dos centros regionales de acondicionamiento y almacenamiento de desechos radiactivos. También se está ejecutando con éxito un programa internacional para recuperar potentes generadores termoeléctricos de radioisótopos que se utilizaron con fines de navegación (por ejemplo, baterías para faros) a lo largo de la costa de la Federación de Rusia. La mayoría de los 1 007 generadores termoeléctricos de radioisótopos del país ya han sido recuperados, y solo quedan 119.

65. Están llevando a cabo programas en gran escala de procesamiento de desechos históricos el Canadá (Laboratorio Nuclear de Chalk River), la Federación de Rusia (Mayak y Siberian Chemical Combine) y los Estados Unidos de América (Laboratorio Nacional de Savannah River). En Hanford (Estados Unidos de América), la construcción de la planta de tratamiento de desechos más grande del mundo está finalizada en un 50% aproximadamente. La planta cuenta con un presupuesto de 12 000 millones de dólares y está previsto que comience a funcionar en 2019. En ella se procesarán y estabilizarán unos 200 000 m³ de diversas clases de desechos históricos complejos mediante un tratamiento previo seguido de vitrificación.

Desechos radiactivos generados por el accidente de Fukushima Daiichi

66. Los desechos radiactivos generados por el accidente de Fukushima requieren no solo las medidas a corto plazo que se adoptaron en el emplazamiento de la central nuclear después del accidente, sino también medidas a largo plazo para la gestión de todos los desechos durante su ciclo de vida, tanto en el emplazamiento como fuera de él.

67. En respuesta a una solicitud del Gobierno del Japón, el Organismo organizó una misión investigadora que tuvo lugar del 7 al 15 de octubre de 2011 en apoyo de la restauración de grandes zonas contaminadas fuera del emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Los objetivos de la misión eran prestar asistencia a los planes del Japón para restaurar grandes zonas contaminadas por el accidente; examinar las estrategias, los planes y las actividades de restauración del Japón, comprendida la elaboración de mapas de la contaminación; e intercambiar sus conclusiones con la comunidad internacional como parte del esfuerzo conjunto por difundir ampliamente las enseñanzas extraídas del accidente. El informe de la misión, publicado en noviembre de 2011, destacaba nueve esferas de progresos importantes y ofrecía asesoramiento sobre doce puntos en los que, en opinión del grupo encargado de la misión, las prácticas que se estaban aplicando se podían mejorar. El asesoramiento abarca mejoras en la estrategia, los planes y las técnicas específicas de restauración, teniendo en cuenta tanto las normas internacionales como la experiencia obtenida de programas de restauración en otros países.

68. La restauración de la tierra contaminada en los alrededores de Fukushima requerirá la construcción de instalaciones de almacenamiento que puedan contener entre 15 y 28 millones de m³ de

desechos. Para esas instalaciones se precisará una superficie de 3 a 5 km² y deberán estar disponibles en un plazo de tres años. Será necesario estudiar opciones de disposición final de estos desechos a su debido tiempo.

69. La acumulación de grandes volúmenes de agua contaminada con cesio 134 y cesio 137 en los sótanos de los reactores, los edificios de turbinas y las zanjas dio lugar a una situación crítica con peligro inminente de rebosamiento y fugas al medio ambiente. Además de los grandes volúmenes afectados, un importante desafío para el tratamiento de esta agua contaminada es la presencia de petróleo y las altas concentraciones de iones de sodio procedentes del agua de mar. Las instalaciones de tratamiento existentes resultaron dañadas y no se podían utilizar. Se logró controlar la situación mediante la rápida movilización del apoyo local e internacional para establecer sistemas de tratamiento eficientes de alto rendimiento gracias a los cuales se han tratado con éxito más de 150 000 m³ de aguas residuales. Se desplegó una variedad de tecnologías en una configuración transportable montada sobre plataforma, comprendidas la floculación-precipitación, el intercambio iónico en zeolita, la ósmosis inversa y la evaporación. El agua descontaminada y desalada fue reciclada con éxito para refrigerar los núcleos de los reactores dañados. El agua de las piscinas de almacenamiento de combustible gastado situadas en los reactores también está siendo tratada mediante el despliegue de sistemas móviles de menor capacidad. Este esfuerzo planteará dificultades en el futuro relacionadas con la gestión del lodo químico altamente radiactivo y las columnas de zeolita gastada.

70. La retirada del combustible de los reactores dañados requerirá el desarrollo de instrumentos especiales, equipo de manipulación y soluciones para el procesamiento de los desechos transuránicos problemáticos. Se prevé que el desarrollo de instrumentos y métodos para gestionar esos desechos lleve algún tiempo y requiera un alto nivel de competencia técnica.

Clausura

71. Las estadísticas mundiales sobre la clausura de reactores de potencia variaron marginalmente en 2011. Al final del año, 124 reactores de potencia se encontraban en régimen de parada. En 2011 concluyó el desmantelamiento del reactor avanzado refrigerado por gas (AGR) Windscale en el Reino Unido, lo que eleva a 16 el número de reactores de potencia en régimen de parada y completamente desmantelados. Cincuenta reactores de potencia se encontraban en proceso de desmantelamiento, 49, en modalidad de confinamiento seguro, tres, sepultados, y en el caso de otros seis aún no se habían especificado estrategias de clausura.

72. El desmantelamiento del AGR Windscale, central nuclear experimental construida en el decenio de 1960, concluyó en 2011 tras doce años de difícil trabajo. El proyecto ha proporcionado un plan básico para la clausura de los otros 14 AGR existentes en todo el Reino Unido cuando alcancen el final de su vida útil.

73. Studsvik de Suecia firmó a finales de 2011 un contrato con LLW Repository Ltd (LLWR) del Reino Unido para el transporte de cinco intercambiadores de calor antiguos, de más de 300 toneladas cada uno, desde la central nuclear en situación de clausura de Berkeley Magnox hasta Suecia, y su desmantelamiento, durante el que se reciclará hasta un 90% de su contenido de metales.

74. El costo en los Estados Unidos del desmantelamiento y la clausura nucleares ha sido estimado en 69 300 millones de dólares. Los fondos destinados a la clausura en los Estados Unidos han resultado adecuados. La transferencia de la propiedad de la central nuclear Zion de Exelon Corporation a Energy Solutions en 2010 demostró que los fondos que la ley asigna para pagar las futuras actividades de clausura son suficientes para la ejecución efectiva de esas actividades.

A.4. Seguridad¹⁵

75. En 2011, los debates sobre la seguridad de las centrales nucleares estuvieron dominados por la necesidad de determinar y aplicar las enseñanzas que pudieron extraerse del accidente en la central nuclear de Fukushima-Daiichi, causado por los desastres naturales extraordinarios del terremoto y el tsunami que golpearon al Japón el 11 de marzo de 2011.

76. En junio de 2011, el Organismo convocó una Conferencia Ministerial sobre Seguridad Nuclear para examinar una evaluación inicial del accidente de Fukushima, estudiar las enseñanzas que debían extraerse, ayudar a iniciar un proceso destinado a mejorar la seguridad nuclear en todo el mundo y analizar formas de fortalecer aún más la respuesta a accidentes y emergencias nucleares. Muchos Estados Miembros realizaron exámenes en 2011 como parte de las evaluaciones de la seguridad nacional (a menudo denominadas “pruebas de resistencia”), y se comprometieron a finalizar sin demora cualquier evaluación pendiente y aplicar las medidas correctoras necesarias.

77. En un primer momento tras el accidente se concluyó que era necesario que los explotadores de las centrales nucleares de todo el mundo revisaran y fortalecieran, según procediera: a) las medidas de protección contra peligros extremos como los tsunamis; b) las capacidades de electricidad y refrigeración en caso de accidentes graves; c) las disposiciones para gestionar accidentes graves; y d) las bases de diseño de las centrales, es decir, los supuestos sobre un conjunto predeterminado de accidentes que deben ser tenidos en cuenta.

78. Aunque aún quedan enseñanzas por extraer, se elaboraron planes de acción a escala tanto nacional como internacional que aplican las enseñanzas preliminares del accidente. El Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear define un programa de trabajo para fortalecer el marco mundial de seguridad nuclear. Fue aprobado por la Conferencia General en septiembre de 2011 y establece doce medidas principales.¹⁶

79. Quizá se puedan extraer más enseñanzas, que podrían ser incorporadas, según convenga, en estas medidas mediante la actualización del Plan de Acción. En diciembre de 2011, el Gobierno del Japón anunció que los reactores de la central nuclear de Fukushima-Daiichi habían alcanzado una “situación de parada fría” y se encontraban en estado estable, y que la emisión de materiales nucleares estaba bajo control.

80. Desde el punto de vista operacional, el nivel de seguridad de las centrales nucleares en todo el mundo sigue siendo alto, como señalan los indicadores de seguridad recopilados por el OIEA y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO). En la figura A-4 se presenta el número total de paradas de emergencia no previstas, tanto automáticas como manuales, que se producen cada 7 000 horas de funcionamiento crítico de los reactores de potencia y que han sido recopiladas por el Organismo en la base de datos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS)¹⁷. Esta información permite observar el desempeño en la tarea de reducir el número de paradas imprevistas totales de los reactores y suele utilizarse como indicador del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales. Como se muestra en la figura A-4, aunque en los últimos años se han logrado mejoras constantes, no son tan notables como las alcanzadas en el decenio de 1990. Sin embargo, la diferencia entre quienes obtienen los mejores y los peores resultados sigue siendo considerable, y existe margen para seguir mejorando. En el Examen de la seguridad nuclear 2012

¹⁵ Puede obtenerse más información sobre seguridad nuclear en el Examen de la seguridad nuclear 2012 o en el Informe Anual del OIEA.

¹⁶ El texto del Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear se puede consultar en la dirección: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/English/gc55-14_en.pdf.

¹⁷ <http://prisweb.iaea.org>

puede obtenerse información más detallada sobre temas nucleares intersectoriales y sobre las novedades recientes en la esfera de la seguridad en 2011, además del accidente de Fukushima-Daiichi.

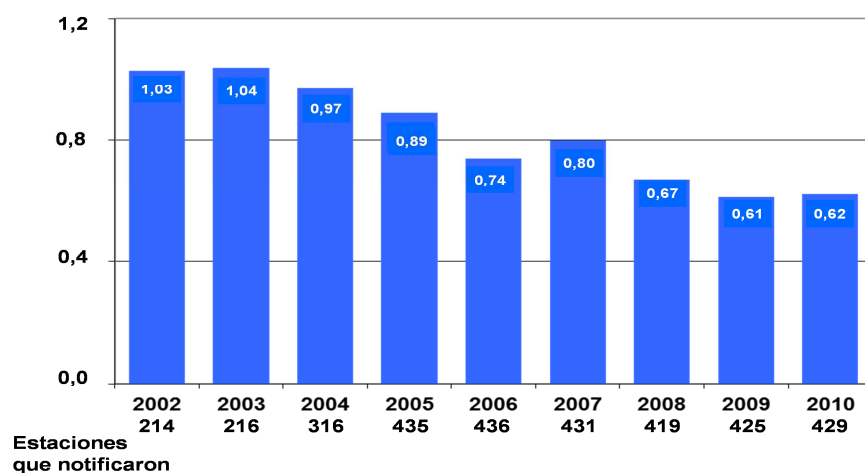


Fig. A-4. Número total de paradas de emergencia no previstas, tanto automáticas como manuales, que se producen cada 7 000 horas de funcionamiento crítico de los reactores de potencia (Fuente: OIEA).

B. Fisión avanzada y fusión

81. La experiencia operacional con los reactores existentes, junto con los avances de la ciencia y la ingeniería nucleares, impulsan constantemente el desarrollo de nuevos diseños de reactores avanzados. En esta sección se resumen las novedades habidas en el diseño de los reactores basados, en primer lugar, en la fisión nuclear, y en segundo lugar, en la fusión nuclear.

B.1. Fisión avanzada

B.1.1. Reactores refrigerados por agua

82. En el Canadá, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN) prosigue el examen preliminar del diseño del proyecto del CANDU-6 mejorado de 700 MW(e), que incorpora varias innovaciones a partir del diseño del CANDU-9, así como la experiencia reciente con unidades de CANDU-6 construidas en China y la República de Corea. Candu Energy también ha seguido desarrollando el reactor CANDU avanzado (ACR-1000), que incorpora un gran número de componentes normalizados, y que funciona con uranio ligeramente enriquecido para compensar la utilización de agua ligera como refrigerante primario. En enero de 2011, la CCSN finalizó las tres fases del examen preliminar del diseño del proyecto del ACR-1000, con lo que éste pasó a ser el primer reactor nuclear de potencia avanzado que ha completado este examen del diseño por la CCSN. Atomic Energy of Canada Limited (AECL) está desarrollando activamente un reactor CANDU refrigerado por agua supercrítica (SCWR), que favorecerá el liderazgo del Canadá en el programa SCWR del Foro Internacional de la Generación IV (GIF).

83. En China hay en construcción 26 reactores de agua a presión (PWR), entre ellos los PWR evolutivos de 650 MW(e) y 1 080 MW(e), que se basan en la tecnología existente de las centrales en explotación, así como en diseños más nuevos del AP-1000 y el reactor europeo de agua a presión (EPR). El nuevo Ling Ao-4, un reactor de diseño CPR 1000, fue conectado a la red el 3 de mayo de 2011. China sigue desarrollando los diseños CAP-1400 y CAP-1700, que son versiones en mayor

escala del AP-1000. Al mismo tiempo, China sigue invirtiendo en investigación para el diseño de un SCWR chino.

84. En Francia, AREVA sigue comercializando el EPR de 1 600+ MW(e) y continúa desarrollando el PWR ATMEA de 1 100+ MW(e), conjuntamente con Mitsubishi Heavy Industries del Japón, y el reactor de agua en ebullición (BWR) KERENA de 1 250+ MW(e), en asociación con E.ON de Alemania.

85. En la India hay en construcción cinco reactores: tres reactores de agua pesada a presión (PHWR) evolutivos de 700 MW(e) y dos reactores de potencia refrigerados y moderados por agua (WWER) de 1 000 MW(e). Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) ha desarrollado un PHWR evolutivo de 700 MW(e). El Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (BARC) está finalizando el diseño de un reactor avanzado de agua pesada (AHWR) de 300 MW(e), que utilizará torio con agua pesada como moderador, agua ligera en ebullición como refrigerante en tubos de presión verticales, y sistemas de seguridad pasiva.

86. En el Japón hay en construcción dos reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR) en Ohma y Shimane-3, y otros ABWR se encuentran en fase de planificación. Hitachi sigue desarrollando versiones de 600, 900 y 1 700 MW(e) del ABWR, así como el ABWR-II de 1 700 MW(e). La versión de 1 700 MW(e) del reactor avanzado de agua a presión (APWR) de Mitsubishi Heavy Industries para el mercado estadounidense, el US-APWR, está siguiendo el proceso de certificación del diseño de la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos. También se está desarrollando una versión europea del APWR, el EU-APWR, que será evaluada para determinar si cumple los European Utility Requirements. Asimismo, el Japón sigue desarrollando un diseño de SCWR innovador.

87. En la República de Corea, la construcción del primer reactor de potencia avanzado, el APR-1400, avanza según lo planeado. Prosigue el desarrollo de una versión europea del APR-1400, el EU-APR-1400, que será evaluada para determinar si cumple los European Utility Requirements. Ha comenzado el proceso de certificación del diseño de la versión estadounidense, el US-APR-1400, ante la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos con el objetivo de lograr la certificación final en 2015. Paralelamente, en 2011 continuó el desarrollo del APR+ de 1 500 MW(e) y el APR-1000.

88. En los Estados Unidos de América, en diciembre de 2011, la NRC enmendó la certificación del diseño AP1000 modificado de Westinghouse, al que incorporó actualizaciones y mejoras.

89. En la Federación de Rusia continuó la construcción de ocho reactores WWER, comprendidos los WWER-1000 y WWER-1200. Continuaron los planes para desarrollar el WWER-1200A, así como el WWER-600 y el WWER-1800, que están basados en el diseño del WWER-1200 actual. Además, la Federación de Rusia siguió trabajando en el diseño de un reactor SCWR innovador, el WWER-SC, y prosigue la construcción del KLT-40S, un pequeño reactor flotante para aplicaciones especializadas.

B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos

90. Los reactores rápidos se han venido desarrollando durante muchos años en varios países, principalmente como reactores reproductores. La reproducción del plutonio, junto con el reprocesamiento y el reciclaje del combustible, permite a los reactores rápidos extraer entre 60 y 70 veces más energía del uranio que los reactores térmicos, capacidad que posibilitaría aumentos muy notables en la energía nucleoelectrónica a más largo plazo. Los reactores rápidos también pueden contribuir a reducir las reservas de plutonio acumuladas, así como el tiempo de aislamiento necesario de los desechos radiactivos de alto nivel mediante el empleo de radioisótopos transuránicos y la transmutación de algunos productos de fisión de período largo.

91. En China, el Reactor Experimental Rápido de China (CEFR) tipo piscina de 65 MW(th) (20 MW(e)), que alcanzó la criticidad por primera vez el 21 de julio de 2010, fue conectado a la red el 21 de julio de 2011. Actualmente se está ejecutando el programa inicial de física del CEFR.

92. La construcción del prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e) de la India en Kalpakkam se encuentra en una etapa muy avanzada: se han instalado las vasijas de seguridad, primaria e interior, y el edificio del reactor está cerrado. La puesta en servicio está prevista para principios de 2013.

93. El Japón está desarrollando el reactor rápido refrigerado por sodio del Japón (JSFR) de 1 500 MW(e) en el marco de su proyecto de desarrollo de tecnología del ciclo de reactores rápidos (FaCT). Tras los sucesos de marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Daiichi, el Japón está evaluando nuevamente la continuación del programa y está previsto que adopte una decisión sobre la continuación del proyecto una vez que el Gobierno haya alcanzado un consenso sobre su política energética nuclear revisada.

94. La República de Corea está ejecutando un amplio programa de investigación y desarrollo en apoyo del reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) de 600 MW(e) denominado KALIMER.

95. En la Federación de Rusia, que opera en Beloyarsk el que es actualmente el reactor rápido comercial más potente del mundo (el BN-600), la construcción del reactor rápido BN-800 sigue avanzando, y se prevé que concluya en 2014 y que la puesta en servicio comience ese mismo año. Asimismo, la Federación de Rusia puso en marcha en 2010 el Programa Federal Objetivo “Tecnologías Nucleoeléctricas de la Próxima Generación para 2010–2015 y Tendencias Futuras hasta 2020” encaminado a desarrollar un reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) avanzado (el BN-1200), dos reactores rápidos innovadores refrigerados por metal líquido pesado (el BREST-OD-300 refrigerado por plomo y el SVBR-100 refrigerado por mezcla eutéctica plomo-bismuto), así como sus correspondientes ciclos del combustible y un nuevo reactor de investigación rápido multipropósito refrigerado por sodio denominado MBIR.

96. En Europa, el Japón, la República de Corea y la Federación de Rusia se han iniciado recientemente distintos programas industriales con el objetivo de poner en funcionamiento nuevas plantas de demostración y prototipos de reactores rápidos en 2025–2030.

97. Para satisfacer las necesidades energéticas europeas a largo plazo, incluida la garantía del suministro, la seguridad, la sostenibilidad y la competitividad económica, la UE, en el marco de su Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (Plan EETE), definió en noviembre de 2010 su dirección tecnológica para el desarrollo de reactores de neutrones rápidos. Esta dirección incluye el SFR como una primera vía, sobre la base de la experiencia anterior en relación con este diseño en Europa, y dos tecnologías de reactores de neutrones rápidos alternativas que serán examinadas a más largo plazo: el reactor rápido refrigerado por plomo (LFR) y el reactor rápido refrigerado por gas (GFR). El programa de demostración y ejecución conexo — Iniciativa Industrial Europea sobre Fisión Nuclear Sostenible (ESNII) — prevé la construcción en Francia del prototipo de SFR conocido como ASTRID y de dos plantas de demostración, ALFRED y ALLEGRO, para las tecnologías alternativas LFR y el GFR respectivamente. El programa también tiene el apoyo de una instalación subcrítica de irradiación de espectro rápido denominada MYRRHA que se está construyendo en Bélgica y que es asimismo una instalación piloto para el prototipo de reactor rápido refrigerado por plomo ‘Alfred’. Con el fin de ensayar la vigilancia de la subcriticidad, se ha construido una maqueta de MYRRHA de potencia nula denominada GUINEVERE, cuya explotación se lleva a cabo en los laboratorios del Centro de Estudios de Energía Nuclear (SCK•CEN) belga en Mol.

B.1.3. Reactores refrigerados por gas

98. En China, el Consejo de Estado aprobó en febrero de 2008 el plan de aplicación correspondiente al reactor de demostración de alta temperatura refrigerado por gas (HTGR). La licencia del proyecto se está examinando.

99. En el Japón han concluido ensayos más estrictos – 90 días en total con 50 días a 950 °C – del reactor experimental de alta temperatura (HTTR). El Gobierno del Japón está examinando la viabilidad de conectar el HTTR a un sistema de producción de hidrógeno para producir hidrógeno en pequeña escala.

100. La República de Corea sigue invirtiendo en varias instalaciones de ensayo para realizar ensayos técnicos de sistemas y componentes de un reactor de alta temperatura (HTR) acoplado a una instalación de producción de hidrógeno. También se prevén aplicaciones de calor industrial, así como la colaboración de varios usuarios de calor industrial con investigadores nucleares a fin de encontrar métodos óptimos para producir calor e hidrógeno por medio de un HTR. La selección de un concepto de reactor está prevista para 2015. El proyecto titulado Desarrollo y demostración de la producción nuclear de hidrógeno (NHDD) está recibiendo un firme apoyo tanto de la industria como del Gobierno.

101. En Sudáfrica se interrumpieron en 2010 los planes para entrar en la fase de construcción del reactor modular de lecho de bolas (PBMR) como resultado, entre otras cosas, de limitaciones de financiación tras la crisis financiera mundial. El proyecto sigue sometido a un “plan de cuidado y mantenimiento” para proteger la propiedad y los bienes intelectuales en cuestión hasta que el Gobierno tome una decisión sobre medidas futuras.

102. En el reactor experimental avanzado (ATR) del Laboratorio Nacional de Idaho (INL), en los Estados Unidos de América, prosiguieron los ensayos experimentales de la seguridad del combustible tri-isotrópico (TRISO), medida en términos de las tasas de fallo del combustible durante prolongados períodos de irradiación. El objetivo de estos experimentos es aportar datos sobre el comportamiento del combustible tras su irradiación en apoyo del desarrollo del proceso del combustible, lograr la cualificación del combustible para su utilización en condiciones de funcionamiento normales, transitorias y de accidente, apoyar la elaboración y validación del código de simulación del comportamiento del combustible y la emisión de productos de fisión PARFUME, y facilitar combustible TRISO irradiado para su examen post-irradiación (PIE) y para realizar ensayos de seguridad/calentamiento. Prosiguen las actividades sobre el PIE y los ensayos de calentamiento en relación con el combustible TRISO irradiado y los especímenes compactos del primer experimento sobre combustible (AGR-1). En el segundo experimento (AGR-2), el combustible se insertó en el ATR en junio de 2010 y el experimento sigue adelante. Los experimentos tercero y cuarto (AGR-3/4) se han combinado en una única serie de ensayos experimentales, e incluyen partículas de combustible TRISO diseñadas para fallar que aportarán datos sobre la emisión de productos de fisión destinados a validar modelos de simulación, así como información sobre el comportamiento del combustible TRISO al ser irradiado a temperaturas más elevadas. Los AGR-3/4 se insertaron en el ATR del INL en diciembre de 2011 y se irradiarán durante dos años. Los experimentos sobre la fluencia por irradiación del grafito prosiguen en el ATR del INL; esos experimentos facilitarán información sobre el comportamiento de diversos tipos de grafito nuclear comercial. El segundo experimento de fluencia del grafito, AGC-2, se insertó en el ATR en febrero de 2011 y el experimento sigue adelante. Se ha finalizado el examen del diseño del AGC-3 y su fabricación se completará en 2012. Los fondos del proyecto de la central nuclear de la próxima generación (NGNP) se centran en la continuación de las campañas de irradiación del combustible TRISO y el grafito, así como en la creación de una asociación público-privada para el diseño, la concesión de la licencia y la construcción del reactor de demostración de la NGNP.

B.1.4. Reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP)¹⁸

103. Según la clasificación aprobada por el Organismo, los reactores de pequeña potencia son reactores con una energía eléctrica equivalente inferior a 300 MW(e) y los reactores de mediana potencia son reactores con una energía eléctrica equivalente de 300 MW(e) a 700 MW(e). Los RPMP pueden constituir una opción nucleoelectrica atractiva y asequible para muchos países en desarrollo que cuentan con redes eléctricas pequeñas, infraestructuras insuficientes y capacidades de inversión limitadas o cuando se requiere flexibilidad en la producción de energía. Los RPMP revisten igualmente particular interés para la cogeneración y la gran cantidad de futuras aplicaciones de calor industrial avanzadas.

104. Actualmente se están construyendo 13 RPMP en seis países, a saber: Argentina, China, Eslovaquia, Federación de Rusia, India y Pakistán. Se están desarrollando reactores de pequeña y mediana potencia para todas las líneas principales de reactores, comprendidos los reactores de agua ligera (LWR), los reactores de agua pesada (HWR), los reactores refrigerados por gas (GCR) y los reactores rápidos de metal líquido (LMFR).

105. En la Argentina, los trabajos relacionados con el reactor CAREM — un diseño de reactor de agua ligera (LWR) a presión de tipo integral y pequeña potencia eléctrica de 150-300 MW(e) en el que todos los componentes primarios están situados dentro de la vasija del reactor — comenzaron en septiembre de 2011 con la excavación en el emplazamiento para el prototipo de central CAREM de 27 MW(e).

106. En el Brasil, se ha elaborado el diseño conceptual del reactor nuclear de lecho fijo de 70 MW(e), el cual no necesita recarga de combustible *in situ*.

107. El Canadá ha desarrollado y puesto en explotación a escala mundial la serie de reactores CANDU, que ofrece varias potencias nominales. El reactor CANDU-6 mejorado es la nueva versión que mantiene las características básicas del diseño del CANDU-6 y tiene una capacidad eléctrica bruta de 740 MW(e).

108. China ha desarrollado PWR de 300 MW(e) y 600 MW(e). Ya se han instalado varias unidades en 2011 y se estaban construyendo dos unidades del CNP-600. El Pakistán también ha instalado dos unidades del CNP-300 importadas de China. Además, la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) firmó en noviembre de 2011 un acuerdo con las autoridades municipales de la ciudad de Zhangzhou para construir dos pequeños reactores nucleares de potencia modulares.

109. Desde hace dos años aproximadamente se viene desarrollando en Francia la Flexblue, una pequeña central nuclear submarina que estará ubicada en el fondo del mar y conectada a redes eléctricas situadas en tierra, con una potencia de unos 150 MW(e).

110. En la India hay en funcionamiento o en construcción 21 HWR de 220 MW(e), 540 MW(e) y 700 MW(e). El reactor avanzado de agua pesada (AHWR) de 304 MW(e), que utilizará combustible de mezcla de óxidos (MOX) de UPE y torio e incorporará tubos de presión verticales y elementos de seguridad pasiva, se encuentra en la fase de diseño básico.

111. El Japón está desarrollando el reactor 4S (por las cuatro S de *Super-Safe, Small and Simple*: superseguro, pequeño y sencillo), a saber, un pequeño reactor rápido refrigerado por sodio que está diseñado para generar 10-50 MW(e) y puede estar situado dentro de un cámara cilíndrica sellada bajo tierra, con el edificio en la superficie.

¹⁸ El Organismo ha publicado un folleto titulado *Status of Small and Medium Sized Reactor Designs* que puede descargarse aquí: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>. Su finalidad es complementar el Sistema de información sobre reactores avanzados (ARIS) del Organismo, que se encuentra en <http://aris.iaea.org>.

112. La República de Corea ha desarrollado el diseño del reactor modular avanzado integrado en el sistema (SMART), que tiene una capacidad térmica de 330 MW(t) y está concebido para la desalación de agua de mar. Se puso en marcha un proyecto de diseño de planta piloto para la verificación exhaustiva del comportamiento. Se prevé que el diseño estándar del SMART de 100 MW(e) obtenga la aprobación final en el primer trimestre de 2012 antes de que se construya un prototipo de planta.

113. En el Pakistán, hay tres RPMP en funcionamiento, a saber, KANUPP-1, CHASNUPP-1 y CHASNUPP-2, y hay dos reactores CNP-300, importados de China para las unidades 3 y 4 de CHASNUPP, en construcción.

114. En la Federación de Rusia se están elaborando seis diseños de RPMP refrigerados por agua ligera. Asimismo, se están construyendo dos unidades de la serie KLT-40S que serán montadas en una plataforma flotante y se utilizarán para la cogeneración de calor industrial y electricidad. La Federación de Rusia también ha desarrollado el SVBR-100, un reactor rápido de pequeña potencia que utiliza como refrigerante una aleación eutéctica de plomo-bismuto y tiene una potencia nominal de 100 MW(e).

115. En Eslovaquia se están construyendo dos unidades del VVER-440, basado en la tecnología rusa, para las unidades 3 y 4 de Mochovce. Se prevé que las unidades entren en funcionamiento en 2012 y 2013, respectivamente.

116. En los Estados Unidos de América se están desarrollando cuatro PWR integrales refrigerados por agua ligera, a saber, el mPower, el NuScale, el reactor modular intrínsecamente seguro Holtec (HISMUR), y el Westinghouse SMR. El mPower es un diseño de central bimodular, formado por dos módulos de 185 MW(e), que ofrece la posibilidad de agregar otros módulos dobles en caso necesario. El NuScale Power proyecta una central nuclear que incorpora hasta doce módulos de 45 MW(e) autónomos y cuya explotación se lleva a cabo en condiciones de circulación natural en condiciones de funcionamiento y posteriores a un accidente. El Westinghouse SMR es un diseño conceptual de 225 MW(e) en que se incorporan sistemas de seguridad pasiva y se utilizan algunas de las filosofías de seguridad pasiva y características del diseño de LWR de grandes dimensiones AP-1000. El HISMUR es un diseño de 145 MW(e) que, al igual que los módulos del NuScale, no precisa bombas para la circulación del refrigerante. Está previsto que los cuatro conceptos se presenten entre 2013 y 2015 a la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos para que examine la certificación de los diseños. El proyecto del reactor internacional innovador y seguro (IRIS), que actualmente está ejecutando un consorcio internacional, tiene por objeto elaborar un diseño de PWR integral con una capacidad eléctrica de 335 MW(e). Se ha desarrollado el reactor modular tipo PRISM, que es un reactor reproductor rápido refrigerado por metal líquido de 311 MW(e), y se está considerando la posibilidad de presentar una solicitud de certificación del diseño a la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos.

117. Se están elaborando varios diseños de GCR de la categoría RPMP. China ha construido el HTR-10, que es un reactor experimental de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por helio. Posteriormente, en marzo de 2011 el Gobierno chino aprobó la construcción de una central dotada de un reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por gas (HTR-PM) formado por dos módulos de 250 MW(t). En los Estados Unidos de América, el reactor modular de turbina de gas refrigerado por helio (GT-MHR) de 150 MW(e) es un diseño conceptual que podría producir hidrógeno mediante la electrólisis de alta temperatura o la separación termoquímica del agua. Por último, el diseño del Módulo Multiplicador de Energía (EM²) tiene por objeto utilizar combustible nuclear gastado sin haberlo sometido al reprocesamiento convencional.

B.1.5. El INPRO y el GIF

118. El Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del OIEA, que da apoyo a los Estados Miembros en el desarrollo y la utilización de sistemas de energía nuclear sostenibles, dio la bienvenida en 2011 a tres nuevos miembros, a saber, Egipto, Israel y Jordania, con lo que el número de miembros ascendió a 35. En el documento titulado “INPRO

Development Vision 2012–2017”, preparado en 2011, se expone el objetivo de trabajo estratégico para lograr la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear a escala mundial mediante la elaboración de modelos y el análisis de escenarios de transición; la promoción de las innovaciones técnicas e institucionales necesarias; y la prestación de apoyo a los Estados Miembros en la formulación de estrategias nacionales de energía nuclear de gran alcance.¹⁹

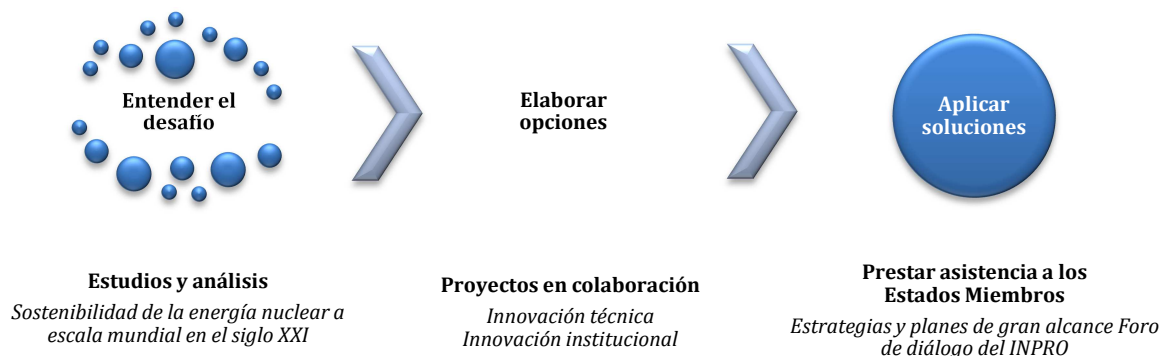


Fig. B-1. Sostenibilidad de la energía nuclear a escala mundial y contribución del INPRO.

119. En 2011 se puso en marcha un nuevo proyecto, en el marco del Foro de diálogo del INPRO sobre las innovaciones en la energía nuclear, para determinar “consideraciones comunes de los usuarios”, en particular de los usuarios de tecnología de reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP). También en 2011 se realizaron cuatro evaluaciones de los sistemas de energía nuclear (NESA), a saber, en Belarús, Indonesia, Kazajstán y Ucrania respectivamente, y el conjunto informativo de apoyo de las NESA, elaborado por el Organismo para apoyar a los países en su autoevaluación, se amplió con el fin de incorporar datos de muestra y programas informáticos e-NESA. En 2011 se finalizó el proyecto en colaboración del INPRO titulado Arquitectura global de los sistemas nucleares innovadores basados en reactores térmicos y rápidos, incluidos los ciclos del combustible cerrados (GAINS). En él se determinaron y cuantificaron los beneficios de la transición a un sistema de energía nuclear sostenible a escala mundial basado en reactores rápidos y ciclos del combustible cerrados. En 2011 se inició un proyecto de seguimiento titulado Interacciones sinérgicas entre grupos regionales sobre energía nuclear evaluadas en relación con la sostenibilidad (SYNERGIES), con el objetivo de cuantificar en detalle los beneficios de la colaboración y las sinergias entre los países en este proceso de transición.

120. Mediante un sistema de contratos y acuerdos, el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) coordina las actividades de investigación sobre seis sistemas de energía nuclear de la próxima generación seleccionados en 2002 y descritos en la publicación *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems*: los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR), los reactores refrigerados por plomo (LFR), los reactores de sales fundidas (MSR), los reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), los reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR) y los reactores de muy alta temperatura (VHTR). Los seis sistemas seleccionados emplean una diversidad de tecnologías de reactor, conversión de energía y ciclo del combustible. En sus diseños se utilizan espectros de neutrones térmicos y rápidos, ciclos del combustible cerrados y abiertos, y una amplia gama de tamaños de reactores, desde muy pequeños hasta muy grandes. En función de sus respectivos grados de madurez técnica, se prevé que estos sistemas estén disponibles para introducirlos

¹⁹ Esta publicación se encuentra en [http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_\(Final\).pdf](http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_(Final).pdf).

comercialmente en el período comprendido entre 2020 y 2030 o más tarde. En la actualidad, el GIF tiene 13 miembros.²⁰

121. El Organismo y el GIF cooperan en las esferas del riesgo y la seguridad, la resistencia a la proliferación y la protección física, la elaboración de modelos y las metodologías de evaluación económica, así como otros temas como los RPMP, el uso del torio y las implicaciones del ciclo del combustible. En 2011, la quinta reunión de contacto GIF/INPRO confirmó nuevamente la cooperación entre el GIF y el INPRO, en particular en los métodos de evaluación de la resistencia a la proliferación y los aspectos de seguridad de los SFR.

B.2. Fusión

122. El proyecto relativo al Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) es un proyecto experimental destinado a demostrar la viabilidad científica y tecnológica y los elementos de seguridad de la energía de fusión con fines pacíficos. China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia, la India, el Japón, la República de Corea y la Unión Europea participan en este proyecto de cooperación internacional. El ITER está evolucionando rápidamente, como muestran las intensas actividades de construcción en el emplazamiento y un número creciente de conjuntos de compra con los diversos componentes de los dispositivos y de la instalación. Entre los progresos logrados en la construcción del emplazamiento del ITER en 2011 figuran la finalización del edificio de la celda caliente, la excavación de la sala de ensamblaje, la losa de cimentación del pozo sísmico de hormigón del complejo del tokamak y la instalación de bobinado de serpentines del campo poloidal. Al final de 2011 ya se había firmado un total de 65 de los 126 acuerdos de compra, por un valor total superior a tres mil millones de euros, lo que representa el 74% del valor total de las compras para la construcción del ITER. Se está procediendo a la construcción de componentes principales (como la cámara de vacío) y a la producción de partes fundamentales (como los superconductores del campo toroidal) en los Estados que son miembros del ITER. No obstante, es preciso adoptar medidas que permitan reducir al mínimo los retrasos en el calendario del proyecto causados por el terremoto y el tsunami del Japón de marzo de 2011.

123. Junto con el ITER, también se han destinado esfuerzos a escala internacional a elaborar una hoja de ruta para la producción de electricidad a partir de la fusión por confinamiento magnético (MCF). Estas actividades se han centrado en las cuestiones científicas y tecnológicas que se plantean para el establecimiento de una central de demostración de la fusión (Demo) y las actividades de investigación y desarrollo necesarias previas a la Demo. Se han determinado varias cuestiones de importancia estratégica a las que la comunidad internacional debe prestar más atención:

- los supuestos utilizados en los códigos de diseño para la fusión — los diseños de los reactores de fusión dependen en gran medida de los supuestos de física y tecnología que se utilicen en la fase de diseño;
- el desarrollo de materiales para la fusión — los ensayos de irradiación son una necesidad y pueden determinar la trayectoria crítica para desarrollar materiales estructurales y de la primera pared de la Demo;
- el desarrollo de mantos — la autosuficiencia del tritio es un requisito para el desarrollo de la fusión más allá del ITER, por lo que se requerirán mantos de reproducción básicamente para cualquier instalación nuclear de fusión posterior, independientemente de su propósito;
- soluciones para el plasma descargado — los requisitos de descarga de calor y de partículas de los dispositivos de fusión de alto ciclo de trabajo van más allá de los del ITER;

²⁰ Argentina, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos de América, Euratom, Federación de Rusia, Francia, Japón, Reino Unido, República de Corea, Sudáfrica y Suiza.

- los requisitos para las diversas opciones de instalación siguientes — es preciso disponer de un plan para colmar las brechas en la preparación y satisfacer las necesidades de desarrollo relativas a las tecnologías de fusión clave a tiempo para contribuir al cumplimiento de los calendarios de la instalación.

124. Estas cuestiones revisten una importancia estratégica porque la forma en que se aborden influirá en gran medida la hoja de ruta en su conjunto. De momento no hay consenso al respecto entre la comunidad internacional de especialistas en fusión.

125. Del 8 al 13 de octubre de 2012 se celebrará en San Diego (California, Estados Unidos de América), la 24ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión (FEC 2012).



Fig. B-2. Izado de las bobinas superconductoras de corrección de campo que se utilizarán en el ITER, Instituto de Física del Plasma, Hefei (China).

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

C.1. Aceleradores

126. Las fuentes de neutrones basadas en aceleradores, como las que se encuentran en instalaciones de fuentes de neutrones por espalación, se han utilizado durante los últimos decenios como complemento de los reactores de investigación. Actualmente se están diseñando y construyendo nuevas instalaciones de fuentes de espalación en China y Suecia. En China, la ceremonia de colocación de la primera piedra de la fuente de neutrones por espalación de China (CSNS), que constará principalmente de un acelerador lineal de H⁺ y un sincrotrón de protones de ciclo rápido, se celebró el 20 de octubre de 2011. Se prevé que la construcción de la CSNS se prolongue durante siete años, y que la puesta en servicio y la explotación comiencen en 2016 y 2018, respectivamente. En Suecia se está construyendo en la Fuente Europea de Espalación (ESS). Situada en Lund (Suecia) y copatrocinada por Dinamarca, la ESS estará financiada y será explotada por una asociación de 17 países europeos. Actualmente se está examinando un diseño técnico que se utilizará como prototipo para la construcción de la ESS, cuyo inicio está previsto para 2013. Se espera que la ESS entre en funcionamiento en 2019 y que brinde nuevas oportunidades para los investigadores en una amplia serie de esferas de investigación relacionadas con los análisis de materiales tanto a granel como a nivel molecular. Entre esas esferas figuran: la metalurgia; las ciencias de los materiales, incluidos los nanomateriales y los materiales nuevos para las investigaciones sobre energía; la arqueología; la ingeniería ambiental; la tecnología alimentaria así como las ciencias químicas, bioquímicas y farmacéuticas.

127. El terremoto y el tsunami que se produjeron en el Japón en marzo de 2011 afectaron en gran medida el Complejo de Investigación del Acelerador de Protones del Japón (J-PARC). En 2011 se evaluaron y repararon los daños causados, tras lo cual se prevé que el J-PARC reanude sus operaciones.

128. Se están construyendo en todo el mundo nuevas instalaciones de sincrotrón para responder a la creciente demanda en toda la comunidad científica. En Lund (Suecia), se está construyendo MAX IV, una instalación de sincrotrón de tercera generación, cuya puesta en servicio, una vez construida, está prevista para 2014. Su diseño incluye la opción de un láser de electrones libres (FEL) en una segunda fase de desarrollo. Asimismo, el Laboratorio de Luz de Sincrotrón ALBA en España ha iniciado la puesta en servicio del haz en 2011 y tiene previsto acoger a sus primeros usuarios a principios de 2012.

129. Las instalaciones basadas en el FEL de cuarta generación — FERMI@Elettra (Italia), XFEL (Alemania) y SwissFEL (Suiza) — han logrado progresos importantes. Puesta en servicio en la primavera de 2011, FERMI@Elettra puede generar pulsos muy breves (de una duración inferior a 10^{-15} s) en la región de longitud de onda de 10 a 100 nanómetros (nm). La llegada de los láseres de femtosegundos ha revolucionado muchas esferas de la ciencia, desde la física del estado sólido hasta la biología. Esta nueva frontera de investigación de la ciencia ultrarrápida de la ultravioleta de vacío y los rayos X está impulsando el desarrollo de nuevas fuentes para la generación de pulsos en femtosegundos.

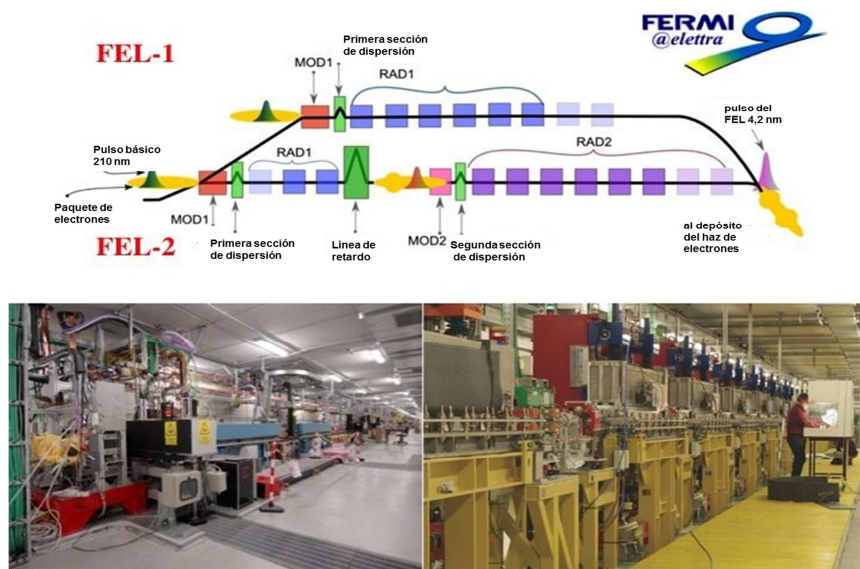


Fig. C-1. Diagrama esquemático del láser de electrones libres FERMI y vistas interiores de la instalación (Fotografía: FERMI@Elettra).

130. La colaboración internacional desempeña una función clave en el campo de las aplicaciones de los haces de iones. Una muestra de esa colaboración es el proyecto financiado por la UE llamado CHARISMA (Infraestructuras de investigación avanzada sobre patrimonio cultural: sinergia para un enfoque multidisciplinario de la conservación y la restauración). CHARISMA combina los esfuerzos de destacados museos europeos (por ejemplo, el Museo del Prado, el British Museum), laboratorios de investigación (por ejemplo, la instalación de sincrotrón Soleil en Francia) y grupos de investigación universitarios para compartir el acceso a instalaciones avanzadas, desarrollar tecnologías aplicables al patrimonio cultural y brindar capacitación a jóvenes investigadores. Se emplean varios métodos, que incluyen técnicas analíticas tradicionales y avanzadas, para investigar las propiedades a granel, microscópicas y en la superficie de artefactos como pinturas, esculturas, metales, cerámica, manuscritos y libros impresos, objetos arqueológicos y otros objetos.

C.2. Reactores de investigación

131. Durante los últimos cinco años, varios Estados Miembros han ampliado su interés en la energía nuclear u otras tecnologías nucleares, incluidos los isótopos médicos e industriales producidos en reactores y la aplicación de las tecnologías nucleares en pos del avance de la ciencia. Como resultado de ello, los reactores de investigación se están convirtiendo cada vez más en componentes fundamentales del desarrollo de las infraestructuras nucleares nacionales o regionales.²¹ Además, se ha desarrollado una tendencia hacia una mayor utilización y renovación de antiguos reactores de investigación a medida que el Organismo trabaja con Estados Miembros con miras a mejorar la sostenibilidad de las instalaciones mediante coaliciones internacionales centradas en una o más instalaciones.

132. Al final de 2011 había en el mundo 672 instalaciones de reactores de investigación, de las cuales 232 estaban en funcionamiento, 13 habían sido temporalmente sometidas a régimen de parada, 211 estaban en régimen de parada permanente, 213 habían sido clausuradas y 3 estaban en construcción.²² Además, se planearon dos proyectos y cinco fueron cancelados. Según las conversaciones preliminares mantenidas con el Organismo, 14 Estados Miembros (indicados más adelante) están estudiando la posibilidad de construir nuevos reactores de investigación o están procediendo a su planificación. Para muchos de esos Estados Miembros, ésta es una primera medida dentro de un programa nacional para implantar la energía nucleoelectrónica, de forma paralela a otras aplicaciones pacíficas de las tecnologías nucleares. En efecto, Arabia Saudita, Azerbaiyán, Sudán y Túnez se encuentran en las primeras fases de la planificación para construir un reactor de investigación como parte de un programa nacional de energía nucleoelectrónica de mayor envergadura. Ha comenzado la construcción de un reactor de investigación multipropósito de 5 MW en Jordania, mientras que un proyecto en Viet Nam tiene por objeto construir un nuevo reactor de investigación en apoyo de un programa nucleoelectrónico nacional. Las naciones que ya utilizan la energía nuclear, entre ellas Argentina, Brasil, Federación de Rusia, Francia, India, Países Bajos, República de Corea y Sudáfrica, también están construyendo o planificando la construcción de nuevos reactores de investigación con fines experimentales y comerciales específicos.

133. A medida que los reactores de investigación más antiguos son retirados y sustituidos por un número menor de reactores multipropósito, se prevé que el número de reactores de investigación e instalaciones críticas operacionales disminuya hasta situarse entre 100 y 150 en 2020. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar un acceso amplio a esas instalaciones y su uso eficiente. Las redes cooperativas internacionales también están resultando útiles para mejorar las instalaciones existentes y crear otras nuevas. Así, además de las seis coaliciones de reactores de investigación existentes en las regiones de África central, Asia central, el Báltico, el Caribe (que incluye la participación de América Latina), Europa oriental y el Mediterráneo, se están gestando, y son necesarias, nuevas coaliciones y redes para aumentar la utilización de los reactores de investigación y hacer que los restantes reactores sean realmente viables. A este respecto, el Organismo también está ayudando a los Estados Miembros a crear una red temática de instalaciones de reactores de investigación que pueda colaborar en actividades comunes de explotación y mantenimiento, incluida la elaboración de una metodología para la puesta en práctica del Servicio de evaluación de la explotación y el mantenimiento de reactores de investigación (OMARR) del Organismo. Los principales objetivos de las misiones OMARR son realizar exámenes por homólogos exhaustivos de la explotación y el mantenimiento de instalaciones de reactores de investigación; verificar el cumplimiento de los procedimientos de la planta en vigor; proponer esferas de mejora; y facilitar la

²¹ Se puede consultar información adicional en el anexo correspondiente del *Examen de la tecnología nuclear – 2012*, en el sitio web GovAtom/Conferencia General.

²² Según la información de la base de datos de reactores de investigación del Organismo, (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/>).

transferencia mutua de conocimientos y experiencia entre los expertos de la misión y el personal del reactor. La red también apoyará el intercambio de información relacionada con la gestión del envejecimiento de los reactores de investigación, colaborará en proyectos coordinados de investigación pertinentes, compartirá desafíos comunes y desarrollará actividades conjuntas.

134. Las cuestiones y los desafíos clave a que se enfrentan actualmente los reactores de investigación fueron objeto de amplio debate en la Conferencia Internacional sobre reactores de investigación: gestión segura y utilización eficaz, celebrada en Rabat (Marruecos) del 14 al 18 de noviembre de 2011. Este importante evento relacionado con los reactores de investigación que organiza el Organismo se celebra cada cuatro años. En la conferencia más reciente se concluyó, entre otras cosas, que las coaliciones de reactores de investigación brindan la oportunidad de ofrecer productos y servicios mediante múltiples reactores que no serían posibles con un solo reactor y que, por lo tanto, los Estados Miembros deberían aprovechar esas coaliciones siempre que sea posible. Otra conclusión importante fue que los Estados Miembros que estén planeando la construcción de un nuevo reactor de investigación deberían aplicar el “enfoque sobre los hitos” del Organismo, y asegurar que existan planes adecuados de utilización y una infraestructura de seguridad y reglamentación adecuada. Actualmente existe una gama diversa de reactores de investigación e instalaciones conexas que ofrecen los diseñadores y proveedores de reactores de investigación, a quienes se aconsejó en la conferencia que adoptaran un enfoque de “seguridad mediante el diseño” y que desplegaran todos los esfuerzos posibles por maximizar los parámetros de seguridad y eficacia, incluidas las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi. Además, sobre la base de un estudio del Organismo realizado mediante un cuestionario, se señaló en la conferencia que se habían adoptado medidas en respuesta al accidente de Fukushima Daiichi en dos tercios de las instalaciones de reactores de investigación participantes. La conferencia recomendó que los explotadores de reactores de investigación examinaran nuevamente de forma activa sus bases de diseño y análisis de la seguridad para determinar si debían efectuarse cambios y mejoras (según las características de los emplazamientos y las instalaciones) de modo que las instalaciones puedan hacer frente a múltiples sucesos externos graves.

135. A lo largo de 2011, la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM), patrocinada por los Estados Unidos, siguió cumpliendo su misión de reducir al mínimo la presencia de uranio muy enriquecido (UME) en el sector nuclear civil, entre otras cosas mediante la conversión, de UME a uranio poco enriquecido (UPE), del combustible de reactores de investigación y los blancos utilizados en la producción de radioisótopos. En 2009, el alcance de la IRAM se amplió de 129 reactores de investigación a aproximadamente 200 reactores de todo el mundo que funcionaban con combustible de UME y, a finales de 2011, 76 de ellos habían sido convertidos a combustible de UPE o sometidos a régimen de parada con anterioridad a la conversión. Un ejemplo reciente es el reactor de investigación de Viet Nam que, el 30 de noviembre de 2011, alcanzó la criticidad con 72 conjuntos combustibles de UPE, con lo que concluyó así la labor iniciada en 2008 de conversión del núcleo del reactor para que utilizara UPE en lugar de UME.

136. Con el apoyo del Organismo, varios Estados Miembros devolvieron combustible de UME de reactores de investigación al país de origen del combustible. La repatriación de combustible a la Federación de Rusia se efectuó con gran éxito en 2010, y 2 500 kg de combustible gastado fueron devueltos de Vinča (Serbia) a la Federación de Rusia. Las actividades de repatriación prosiguieron con buenos resultados en 2011, cuando tanto se logró al respecto en otros Estados Miembros. Se firmó un contrato tripartito con el Instituto Járkov (Ucrania) para que devolviera su última reserva de combustible de UME sin irradiar (casi 224 kg) a la Federación de Rusia antes de marzo de 2012. China prosiguió sus esfuerzos por convertir los reactores miniatura fuente de neutrones (MNSR) del país para que utilizaran UPE en lugar de UME, y tiene previsto trabajar con los Estados Miembros que han adquirido reactores de ese tipo para ayudarlos a convertir sus reactores y repatriar su combustible de UME. El Gobierno de México firmó acuerdos en agosto y noviembre de 2011 para convertir el reactor de investigación TRIGA del país de modo que utilice UPE y repatriar el combustible a los Estados Unidos de América. El primer envío se realizó en diciembre de 2011 y para febrero de 2012 ya había finalizado la repatriación.

137. En 2011 también prosiguió la conversión, de UME a UPE, de los procesos de producción de isótopos médicos y se lograron progresos importantes al respecto. Los Estados Miembros sufrieron graves escaseces de molibdeno 99 (Mo 99) desde finales de 2007 hasta el tercer trimestre de 2010, debido a la parada reiterada e imprevista de reactores antiguos que habían sido utilizados para la irradiación de blancos y de una instalación de procesamiento de blancos de uranio. Como se volvieron a poner en funcionamiento reactores e instalaciones de producción y llegaron nuevos productores a la comunidad relativamente pequeña de suministradores, las escaseces disminuyeron en 2011 y algunos productores reanudaron la conversión de blancos de Mo 99 de UME a UPE. Australia informó de haber alcanzado progresos en sus esfuerzos por aumentar la producción de Mo 99 basado en UPE y, en noviembre de 2011, Egipto confirmó haber realizado con éxito ensayos de irradiación y puesta en servicio para producir Mo 99 a partir de blancos de UPE. Sudáfrica prosiguió su producción comercial de Mo 99 a partir de blancos de UPE, mientras que dos productores importantes de isótopos médicos (Bélgica y los Países Bajos) también comenzaron a formular y ejecutar planes de trabajo para convertir, de UME a UPE, sus procesos de producción en escala comercial. Además, en 2011, el Organismo concluyó un proyecto coordinado de investigación (PCI) de seis años de duración que ha prestado asistencia a siete Estados Miembros (Chile, Egipto, Kazajstán, Libia, Malasia, Pakistán y Rumania) en sus actividades encaminadas a evaluar la viabilidad de producir a nivel nacional suministros en pequeña escala de Mo 99 a partir de UPE basado en la fisión o mediante el empleo de métodos de activación neutrónica. Por último, la investigación de vías alternativas de producción de Mo 99 basadas en tecnologías de aceleradores cobró impulso en 2011 y probablemente continuará en los próximos años.

138. Para la conversión de reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan los combustibles de uranio-molibdeno avanzados y de muy alta densidad que se están desarrollando actualmente. Aunque en 2011 se lograron avances sustanciales en el desarrollo de combustibles de uranio-molibdeno y su cualificación, es preciso realizar más esfuerzos y ensayos, particularmente en el contexto de los programas de irradiación y PIE, para lograr la disponibilidad comercial oportuna de combustibles de UPE cualificados de muy alta densidad.

D. Alimentación y agricultura

D.1. Producción pecuaria y salud animal

139. En junio de 2011, la Conferencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) aprobó una resolución por la que se declaraba la erradicación mundial de la peste bovina. El Organismo celebró este hito en la quincuagésima quinta reunión ordinaria de su Conferencia General en septiembre de 2011. Las técnicas nucleares y conexas contribuyeron de manera importante a la erradicación de la peste bovina mediante el desarrollo y la realización de pruebas de diagnóstico. En particular, el ensayo inmunosorbente ligado a enzima (ELISA), que permite detectar anticuerpos específicos de la peste bovina, así como el virus, desempeñó un papel fundamental en la supervisión de la campaña de vacunación y la determinación de la presencia de la enfermedad en las manadas de animales, así como en la vigilancia de las poblaciones de ganado para confirmar que estaban libres de la enfermedad. Dicho ensayo se basó en un marcado de anticuerpos con radioisótopos desarrollados con anterioridad y en él se utilizaron fósforo 32 y azufre 35 como marcadores de los anticuerpos secundarios. En los sistemas ELISA actuales se utilizan componentes irradiados (sueros y antígenos) para inactivar agentes potencialmente infecciosos y garantizar la seguridad de las pruebas serológicas. Estas técnicas también revisten interés para el tratamiento de otras enfermedades transfronterizas de los animales.

140. Gracias al seguimiento tradicional de las rutas migratorias de las aves silvestres mediante el empleo de marcadores extrínsecos o tecnologías de satélite convencionales (el anillado o el marcado con transmisores) se puede obtener información solo con respecto al número limitado de las aves silvestres que se hayan marcado de ese modo. En 2011 se demostró que, mediante la utilización de la tecnología de rastreo de isótopos estables, se puede obtener información sobre cada ave que se haya capturado o que haya muerto. Esto está resultando sumamente útil en las investigaciones epidemiológicas de la gripe aviar (rastreo del origen de un brote), ya que la enfermedad puede transmitirse fácilmente a largas distancias en un período relativamente corto. Cada vez hay más interés en emplear esta tecnología para determinar la procedencia de productos de origen animal destinados al comercio, independientemente de la documentación legal necesaria para la importación y exportación de esos productos. Concretamente, en el caso de las aves, los perfiles de isótopos estables de las plumas, las garras y los picos pueden ser distintos en función de las pautas de desplazamiento y nutrición de las aves, lo que permite determinar sus rutas migratorias. En 2011 se estableció una “prueba de concepto”, y en 2012 se iniciarán actividades de investigación mediante un proyecto coordinado de investigación (PCI) a fin de fusionar los datos obtenidos de los perfiles de isótopos estables con los obtenidos de la detección de virus en muestras ambientales (heces, depósitos de agua natural) y la determinación del código de barras genético. De esta forma será posible detectar de forma simultánea las rutas migratorias, las especies de aves de que se trate y si son portadores de virus mediante el uso de estrategias de muestreo más flexibles.

141. A diferencia de los prometedoros resultados obtenidos con las vacunas irradiadas con rayos gamma contra patógenos bacterianos (*Brucella abortus*, *Listeria monocytogenes*), protozoarios (*Trypanosoma anulata*, *Schistosoma japonicum*, *Plasmodium*, *Theileria parva*) y parasitarios (*Dictiocaulus viviparous*, *Dictiocaulus filarial*), el examen de la producción de vacunas virales irradiadas sigue siendo insuficiente. Los resultados presentados por científicos de la Escuela de Ciencias Moleculares y Biomédicas de la Universidad de Adelaida (Australia) durante la reunión de expertos celebrada en la Sede del Organismo en Viena (Austria) en abril de 2011, han demostrado que las vacunas antigripales inactivadas gamma pueden dar lugar a una respuesta inmunitaria mucho más amplia que las vacunas convencionales (inactivadas o atenuadas). Esto incluye tanto la inmunidad mediada por células T como por células B, mientras que las vacunas convencionales solo producen principalmente inmunidad mediada por células B. Además, estas vacunas muestran reactividad cruzada entre distintos subtipos de gripe, ampliando así el perfil de protección. Se prevé que, en el futuro cercano, las investigaciones sobre la viabilidad de utilizar la irradiación para producir vacunas virales (para la fiebre aftosa, la fiebre del valle del Rift, la gripe y otros patógenos víricos) contribuyan considerablemente a disponer de estrategias mejoradas para el control de determinadas enfermedades de los animales.

142. En respuesta al accidente de Fukushima en 2011, el Organismo ha estado trabajando para mejorar los programas informáticos destinados a la recopilación, análisis e interpretación de muestras y la adopción de decisiones con respecto a la contaminación de alimentos en caso de emergencia nuclear o radiológica. Los programas informáticos han sido diseñados como bases de datos de integridad referencial en que se utilizan números distintos para vincular los distintos parámetros del proceso de muestreo/notificación. Así pues, el concepto es que los programas informáticos podrán generar en tiempo real numerosos informes definidos por los usuarios. Además, se elaboraron amplios conjuntos de material informativo para los Estados Miembros a fin de ayudarlos a aplicar medidas de restauración relacionadas con los productos de origen animal y otros productos agrícolas. Una vez ultimados, estos programas informáticos servirán de plataforma para proporcionar a los Estados Miembros orientaciones sobre la mejora de sus planes de contingencia nacionales y el fortalecimiento de las contramedidas agrícolas tras un accidente nuclear.

D.2. Gestión de suelos y aguas

143. Según las previsiones, en 2050 la población mundial alcanzará los 9 000 millones, lo que representa un aumento de aproximadamente 2 000 millones en un período de 39 años. Esto supone un aumento previsto del 50% de la demanda de agua. La agricultura utiliza actualmente el 11% de la superficie terrestre mundial para la producción agrícola, y representa el 70% de toda el agua obtenida de acuíferos, arroyos y lagos. Sobre la base de las tendencias actuales relativas a los aumentos de eficiencia y rendimiento en el uso del agua con fines agrícolas, se proyecta que, para satisfacer esa demanda, será preciso aumentar la eficiencia del uso del agua en la agricultura y mejorar las prácticas de protección de la calidad del agua en los terrenos agrícolas. Los avances de la tecnología nuclear pueden ayudar a hacer frente a esos desafíos.

D.2.1. Estimación de las pérdidas de agua y sus efectos en la salinidad en sistemas de riego por inundación mediante el empleo de isótopos estables

144. Estudios recientes²³ han demostrado que las mediciones de los cambios de las huellas isotópicas del agua (deuterio y oxígeno 18) en distintas fases del riego por inundación pueden utilizarse para estimar las pérdidas de agua por evaporación y transpiración de las tierras de cultivo en relación con distintos tipos de suelo y tasas de riego. Este enfoque se basa en el principio de que las moléculas de agua con isótopos más ligeros (hidrógeno 1 y oxígeno 16) abandonan la superficie del líquido con mayor facilidad que los isótopos más pesados (deuterio y oxígeno 18) durante la evaporación, lo que hace que el agua restante se enriquezca en isótopos más pesados. Esos estudios también han demostrado que la vigilancia de las concentraciones de deuterio, oxígeno 18 y cloruro en el agua de riego, el agua del suelo y el agua subsuperficial puede ayudar, con el tiempo, a evaluar los efectos de la evaporación y transpiración en el desarrollo de la salinidad del suelo en sistemas de riego por inundación. De los resultados obtenidos de cuatro lugares de estudio en Australia en 2011 se desprende que la transpiración es la principal causa de la pérdida de agua y, por consiguiente, el factor que más contribuye a los impactos de la salinidad medidos en función del aumento de la concentración de sal en los suelos en un período estudiado de 14 días durante el riego por inundación. Los efectos de la salinidad causados por la transpiración (0,4 a 2,6 t sal/ha) fueron de 3 a 50 veces superiores a los causados por la evaporación (0,01 a 0,3 t sal/ha) de las aguas de riego y del suelo.

D.2.2. Medición zonal de la humedad del suelo mediante el empleo de neutrones de rayos cósmicos

145. La información sobre el contenido de humedad del suelo de toda una zona es útil para estimar la demanda de agua de diversos cultivos y, por lo tanto, contribuye a la programación del riego en gran escala, las previsiones de rendimiento de los cultivos y los estudios sobre el cambio climático. Esta medición fue un desafío en el pasado, ya que la mayoría de los dispositivos disponibles tienen una capacidad de detección de la humedad del suelo de pequeño alcance, a saber, de 0,05 a 1 m de diámetro desde los dispositivos. Como resultado de ello, se precisa un gran número de mediciones, que pueden requerir mucho tiempo y ser costosas. La reciente elaboración en Australia y los Estados Unidos de América del enfoque basado en neutrones de rayos cósmicos representa un gran avance.²⁴ Esta técnica consiste en la medición de los neutrones rápidos generados de manera natural a partir de los rayos cósmicos y los producidos en los suelos como resultado del choque con el agua presente en la superficie terrestre o cerca de ella, lo que permite elaborar mapas del estado de la

²³ Van den AKKER, J. et al.: Salinity Effects from Evaporation and Transpiration under Flood Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **137** (2011):1-11

²⁴ DESILETS, D. et al. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resour. Res.*, **46** (2010): W11505, doi:10.1029/2009WR008726.

humedad del suelo en una zona de aproximadamente 700 m de diámetro hasta una profundidad de 70 cm, la cual abarca las zonas de raíces de la mayoría de los cultivos. En consecuencia, este nuevo instrumento puede complementar dispositivos de medición en un punto, como la sonda de neutrones para medir la humedad del suelo (SMNP), a fin de ofrecer una medida fiable del contenido de la humedad del suelo a nivel de todo el terreno. Además, la sonda de neutrones de rayos cósmicos empleada en esta técnica, denominada COSMOS (“Sistema de observación de la humedad del suelo mediante rayos cósmicos”), es sólida, puede transportarse fácilmente al terreno e integra datos sobre la humedad del suelo de una zona 1 000 veces superior a la que abarca una SMNP. Así pues, la técnica COSMOS lleva menos tiempo y es más económica para las mediciones zonales de la humedad del suelo. También puede emplearse para evaluar la uniformidad de la distribución del agua y la eficiencia de los sistemas de riego en gran escala.



Fig. D.1. Instalación COSMOS en una pradera de Australia (fotografía por cortesía del Dr. Chris Smith, de la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO): Tierra y Agua, Canberra).

D.2.3. Plutonio (^{239}Pu y ^{240}Pu): posible uso de radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva para evaluar la erosión del suelo y la degradación de la tierra

146. Estudios recientes^{25,26} han demostrado que los isótopos de plutonio emisores de radiación alfa, plutonio 239 y plutonio 240 (con períodos de semidesintegración de 24 110 y 6 561 años respectivamente), pueden utilizarse para determinar el movimiento del suelo y los sedimentos en masas de agua. Estos isótopos se asemejan al cesio 137²⁷ en que son radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva derivados de ensayos de armas nucleares que suelen estar presentes en la mayoría de suelos, por lo que no es necesario marcar el suelo con estos isótopos. Sin embargo, la principal ventaja del plutonio 239 y el plutonio 240 frente al cesio 137 radica en que sus períodos de semidesintegración son más largos que el del cesio 137 (30 años), lo que garantiza que el plutonio puede utilizarse a largo plazo como trazador del movimiento del suelo y la deposición. Son necesarios nuevos estudios que pongan a prueba estos isótopos en toda una serie de condiciones agroecológicas.

²⁵ TIMS, S.G. et al.: Plutonium as a tracer of soil and sediment movement in the Herbert River, Australia. Nucl Instrum Meth Section B. **268** (2010) 1150-1154.

²⁶ HOO, W.T et al. 2011: Using fallout plutonium as a probe for erosion assessment. J. Environ. Radio. **102** (2011), 937-942.

²⁷ ZUPANC, V y MABIT, L. 2010. Nuclear techniques support to assess erosion and sedimentation processes: preliminary results of the use of ^{137}Cs as soil tracer in Slovenia. Dela, **33** (2010) 21-36.

D.3. Prácticas de restauración agrícola y tecnologías para mitigar los efectos de la contaminación radiológica

147. Después del accidente de Kyshtym de 1957 en la planta de reprocesamiento de combustible de Mayak en la antigua Unión Soviética se aplicaron por primera vez contramedidas agrícolas a gran escala contra la contaminación radiológica.²⁸ Estas prácticas fueron adaptadas, perfeccionadas y aplicadas en las zonas afectadas por el accidente de Chernóbil de 1986. Se propusieron nuevas medidas reparadoras agrícolas basadas en una evaluación de las propiedades del suelo para los suelos arables y los pastos (fig. D.2.). También se formularon y aplicaron a gran escala en las zonas afectadas por el accidente contramedidas eficaces para reducir al mínimo la contaminación de los productos agrícolas, como la incorporación de ligantes de radionucleidos específicos en los piensos (por ejemplo, hexacianoferrato de amonio férrico para reducir la absorción de cesio radiactivo en los intestinos de los animales de pastoreo), la adición de análogos estables como el calcio para suprimir la absorción de radioestroncio, la alimentación de los animales con productos no contaminados y la monitorización de los animales en vida.



Fig. D.2. Aplicación de opciones de restauración del suelo en una turbera húmeda en el asentamiento de Yelne, región de Rivno (Ucrania) (fotografía por cortesía del Instituto Ucraniano de Radiología Agrícola, Kyiv)

148. Como resultado, se han obtenido y analizado una gran cantidad de datos sobre la eficacia de las contramedidas agrícolas, además de información sobre factores secundarios como los recursos necesarios y los costos. Asimismo, se han realizado importantes esfuerzos para determinar muchos otros factores que afectan a la posible aplicación de las distintas opciones de restauración. Entre ellos figuran las diferentes condiciones ambientales, las propiedades de los radionucleidos, el uso de la tierra de las zonas contaminadas y las prácticas de restauración ya aplicadas por los agricultores locales y las partes interesadas. Todos estos factores pueden incidir de manera importante en la eficacia de las contramedidas agrícolas. Estas conclusiones y enseñanzas fueron recientemente objeto

²⁸ ALEXAKHIN, R.M., "Remediation of areas contaminated after radiation accidents and incidents", Remediation of contaminated environments (Voigt, G. y Fesenko, S., Eds.), Elsevier, Amsterdam (2009) 177-222, cap. 4.

de un examen crítico por el Organismo en el informe del Foro sobre Chernóbil²⁹ y en algunos exámenes de seguimiento realizados por el Organismo y otras organizaciones internacionales.³⁰

149. El accidente de Fukushima en el Japón en 2011, que afectó gravemente a una vasta extensión de tierra agrícola, ha planteado nuevos desafíos. Aunque muchas de las opciones que se utilizaron eficazmente tras los accidentes de Kyshtym y Chernóbil (medidas de restauración agroquímicas y basadas en los suelos) están siendo ensayadas y aplicadas parcialmente en la región de Fukushima, las condiciones específicas de la zona afectada requieren la adopción de nuevos enfoques para garantizar la inocuidad de los alimentos y una producción agrícola sostenible. En particular, se propusieron nuevas técnicas para la restauración de los arrozales inundados.

150. Es bien sabido que la retirada de la capa superficial del suelo, que es el método que se utiliza tradicionalmente, genera grandes volúmenes de suelo que es necesario eliminar. En el Japón se ensayó el uso de un endurecedor del suelo como técnica para retirar más fácilmente las capas menos profundas de la superficie del suelo (fig. D.3.). La ventaja de esta tecnología es que permite retirar más rápida y eficazmente la radiactividad (superior al 80%) del suelo contaminado. El tiempo necesario para la restauración es de solo diez días por hectárea como máximo (incluido el tiempo necesario para que la capa superficial del suelo se endurezca tras aplicar la solución endurecedora).



Fig. D.3. Ensayo de retirada de la capa superficial del suelo tras aplicar un endurecedor (por cortesía del Ministerio de Agricultura, Silvicultura y Pesca (MAFF), el Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) y la Organización Nacional de Agricultura y Alimentación (NARO)(Japón)).

151. En el Japón se está ensayando una segunda técnica nueva concebida específicamente para suelos inundados (es decir, arrozales). Los niveles de radiactividad en el suelo se reducen batiendo la delgada capa superficial de suelo que está inundada, drenando la parte del suelo que queda suspendida (desde arcilla hasta cieno ligero), separando los sedimentos del agua, y por último eliminando solo los sedimentos (fig. D.4.).

²⁹ http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1160_web.pdf

³⁰ FESENKO, S.V., ALEXAKHIN, R.M., BALONOV, M.I., BOGDEVICH, I.M., HOWARD, B.J., KASHPAROV, V.A., SANZHAROVA, N.I., PANOVA, A.V., VOIGT, G., ZHUCHENKO, Y.M., An extended review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident, *Sci. Total. Environ.* **383** (2007) 1-24.



Fig. D.4. Drenaje del suelo suspendido en arrozales del Japón como opción de restauración (por cortesía del Ministerio de Agricultura, Silvicultura y Pesca (MAFF) y la Organización Nacional de Agricultura y Alimentación (NARO)).

152. La eficacia de esta técnica para reducir la concentración de cesio radiactivo en el suelo y la tasa de dosis externa, observada en 2011 en un emplazamiento de ensayos en la prefectura de Fukushima, osciló entre el 15% y el 70%, dependiendo de las propiedades del suelo, es decir, el contenido de arcilla y humus. Cabe destacar que esta técnica genera una cantidad de desechos hasta 30 veces menor que las técnicas basadas en la tradicional retirada de 4 cm de suelo de la capa superficial. En consecuencia, este método reduce al mínimo el deterioro de la fertilidad del suelo.

D.4. Alternativas a la irradiación gamma en relación con la técnica de los insectos estériles³¹

153. En la esterilización de insectos como parte de los programas de control de las plagas de insectos se utilizan tradicionalmente irradiadores de cobalto 60 o cesio 137 que producen radiación ionizante en forma de rayos gamma. No obstante, en respuesta a las crecientes complejidades y dificultades logísticas asociadas al envío transfronterizo de radioisótopos, comenzaron a realizarse esfuerzos encaminados a estudiar otras opciones para la esterilización de los insectos que se utilizan en los programas de gestión de plagas de insectos. Los irradiadores de rayos X y baja energía autónomos, que se utilizan en los institutos médicos para irradiar sangre, emiten rayos X solo cuando están en funcionamiento y la energía es del orden de algunos cientos de keV, por lo que requieren un blindaje mucho menor que los irradiadores gamma.

154. Se han realizado ensayos de esterilización para comparar los efectos del cobalto 60 o los rayos X en los insectos. La información sobre la fertilidad residual, las tasas de eclosión de adultos y la competitividad de apareamiento entre machos tratados con rayos gamma y rayos X que compiten por hembras fértiles en jaulas sobre el terreno no ha revelado hasta ahora diferencias significativas. Las máquinas que incorporan todas las modificaciones identificadas durante la fase de validación ya han sido suministradas a varios Estados Miembros del Organismo. No obstante, se necesitarán varios años a fin de recopilar datos suficientes para confirmar si realmente se trata de una alternativa viable para la esterilización de insectos a gran escala en condiciones operacionales ordinarias.

³¹ Puede consultarse información adicional en el anexo correspondiente del *Examen de la tecnología nuclear – 2012* en el sitio web GovAtom/Conferencia General.

E. Salud humana

E.1. Nutrición

E.1.1. La calidad del crecimiento durante los mil primeros días afecta a la salud de las personas en etapas posteriores de la vida

155. Cada vez se reconoce más el hecho de que una nutrición adecuada durante los mil primeros días de vida desde la concepción hasta los dos años de edad puede incidir considerablemente en la capacidad infantil de crecimiento y aprendizaje, y en el riesgo de contraer enfermedades crónicas, como la diabetes o cardiopatías, en etapas posteriores de la vida.³² Los patrones actuales para evaluar el crecimiento infantil están basados principalmente en el peso y la longitud o estatura (OMS, Ginebra, 2006³³ y 2011³⁴). Los profesionales de la salud pueden vigilar el crecimiento infantil utilizando gráficos que muestran el crecimiento normal en términos de peso y longitud o estatura para la edad. Aunque estas mediciones antropométricas son esenciales, es necesario que la definición de crecimiento sano incluya medidas de “calidad del crecimiento”. El crecimiento sano guarda relación con el desarrollo del tejido magro, mientras que el exceso de grasa corporal está asociado a un mayor riesgo de enfermedades no transmisibles en la edad adulta. Sin embargo, actualmente no se dispone de patrones en relación con la composición corporal infantil.

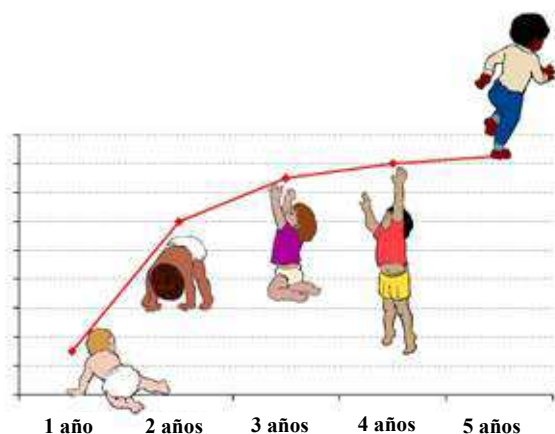


Fig. E.1. Imagen extraída de los patrones de crecimiento infantil de la OMS en la que se muestra la evolución del crecimiento de un niño en sus cinco primeros años de vida. Estos patrones están basados en los datos (estatura, peso, edad) de unos 8 500 lactantes y niños sanos de una amplia variedad de orígenes étnicos y contextos culturales: Brasil, los Estados Unidos de América, Ghana, la India, Noruega y Omán. (Derechos de autor OMS, 2006).

156. En muchos países en transición se han logrado mejoras en relación con el peso infantil que no han venido acompañadas de aumentos proporcionales de la estatura, con el resultado de que al medir esta, los niños de peso normal son clasificados cada vez más como bajos y relativamente gordos, lo que genera preocupación acerca de la “calidad del crecimiento”. Los lactantes de peso o estatura

³² Véase el siguiente sitio web: <http://www.thousanddays.org/>.

³³ Grupo de estudio multicéntrico de la OMS sobre el patrón de crecimiento. Patrones de crecimiento infantil de la OMS: Longitud/estatura para la edad, peso para la edad, peso para la longitud, peso para la estatura e índice de masa corporal para la edad: métodos y desarrollo. Ginebra: Organización Mundial de la Salud (OMS), 2006. Véase: http://www.who.int/childgrowth/standards/technical_report/en/.

³⁴ OMS Anthro (versión 3.2.2, enero de 2011): programa informático para evaluar el crecimiento y desarrollo infantil a escala mundial. Véase: http://www.who.int/childgrowth/standards/technical_report/en/.

similares pueden variar considerablemente en cuanto a su composición corporal. Por ejemplo, los bebés indios son pequeños y delgados al nacer en comparación con los recién nacidos europeos, pero tienen más grasa corporal y mayor riesgo de contraer enfermedades no transmisibles durante su vida adulta posterior.³⁵ Queda claro que aunque las mediciones de la estatura y el peso proporcionan información útil, es necesario evaluar los componentes que contribuyen al peso corporal, en particular las proporciones relativas de masa libre de grasa y masa grasa.

157. Las técnicas nucleares, como la dilución isotópica estable, ofrecen ventajas desde el punto de vista de la sensibilidad y la especificidad para vigilar cambios relativamente pequeños de la composición corporal, y pueden emplearse, por ejemplo, para evaluar programas de intervención nutricional concebidos con el fin de combatir la doble carga que suponen las enfermedades relacionadas con la nutrición, en las que una malnutrición aguda coexiste con la obesidad y con enfermedades crónicas conexas.³⁶

158. En Chile se han empleado técnicas de isótopos estables para evaluar los programas nacionales de intervención destinados a reducir la prevalencia de la obesidad en los niños en edad preescolar. La prevalencia de la obesidad en los niños (de entre 2 y 3 años de edad) que asisten a guarderías nacionales se ha reducido del 10,4% al 8,4%. Como reconocimiento de la necesidad de actuar más temprano, se ha establecido en 2011 un nuevo programa en el que se utilizarán técnicas de isótopos estables para validar un programa sobre el desarrollo motor y de promoción de la actividad física para niños de 6 a 24 meses de edad.

159. En 2011, el Organismo, en estrecha colaboración con expertos internacionales, elaboró directrices para la normalización de las técnicas empleadas en la evaluación de la composición corporal de los lactantes y los niños pequeños.³⁷ Estas directrices son un primer paso esencial hacia el establecimiento de normas para evaluar el crecimiento y la nutrición de los lactantes y los niños pequeños mediante técnicas nucleares y no nucleares de evaluación de la composición corporal.

E.2. Avances en medicina radiológica para el tratamiento del cáncer

E.2.1. La radioterapia moderna exige una gestión de la información de calidad

160. Durante el último decenio, la tecnología de radiooncología se ha vuelto cada vez más compleja y computarizada. Una serie de materiales y accesorios de tratamiento, que se introducen manualmente en los haces de radiación para alterar deliberadamente su fluencia (intensidad) y, de ese modo, optimizar el tratamiento, también están disponibles ahora como aparatos digitales. Por ejemplo, la forma del haz de radiación suelen definirla actualmente los colimadores multihojas, que además de configurar el campo, pueden moverse dentro de él durante el tratamiento. Debido al número de parámetros que definen el tratamiento de cada paciente de radioterapia, ya no es posible programar y aplicar manualmente estos tratamientos complejos, por lo que son necesarios registros electrónicos de los pacientes. Estos registros contienen no solo información administrativa pormenorizada del paciente, su prescripción de radiación y los registros de las dosis de radiación, sino también

³⁵ YAJNIK, C.S. et al., Neonatal anthropometry: the thin-fat Indian baby. The Pune Maternal Nutrition Study, *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.* 27 2 (2003) 173-180.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Appropriate body-mass index for Asian populations and its implications for policy and intervention strategies, *Lancet* 363 (2004) 157-163.

³⁶ CORVALÁN, C. et al., Impact of growth patterns and early diet on obesity and cardiovascular risk factors in young children from developing countries, *Proc. Nutr. Soc.* 68 3 (2009) 327-337.

UAUY, R., KAIN, J. y CORVALÁN, C., How can the Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) hypothesis contribute to improving health in developing countries?, *Am. J. Clin. Nutr.* 94 6 (2011) 1759S-1764S.

³⁷ Organismo Internacional de Energía Atómica, *Body Composition Assessment from Birth to Two Years of Age* (en imprenta).

información detallada de todos los parámetros que definen cada uno de sus campos de radiación. Se necesitan medidas de seguridad jerárquicas controladas por contraseña para asegurar que estos registros se mantengan incorruptos y contengan la información correcta para que el tratamiento sea aplicado de manera reproducible diariamente durante un ciclo de radioterapia, que suele durar algunas semanas.

161. El “sistema de registro y verificación” (SRV) es un tipo de sistema de gestión de bases de datos sobre pacientes de radioterapia, que constituye un elemento central de la mayoría de los departamentos de radioterapia digital modernos. Esos sistemas establecen un enlace entre todo el equipo de obtención de imágenes para radioterapia y de planificación y aplicación del tratamiento (véase la fig. E.2.). Frecuentemente, el equipo de radioterapia se obtiene de distintos proveedores, por lo que se requiere la adhesión a protocolos comunes de comunicación digital a fin de garantizar la integridad de los datos transferidos en todas las interfaces. Por lo general, todo el equipo de radioterapia es objeto de estrictos procedimientos de control de calidad para asegurar que todas las piezas funcionen adecuadamente. Ahora bien, no existen directrices internacionales sobre las pruebas de aceptación y la garantía de calidad sistemática de los SRV. A fin de promover el tratamiento seguro y eficaz de los pacientes, en 2011 el Organismo ha elaborado directrices para la gestión adecuada de la calidad de los SRV, que han sido refrendadas por los principales suministradores de equipo de radioterapia.

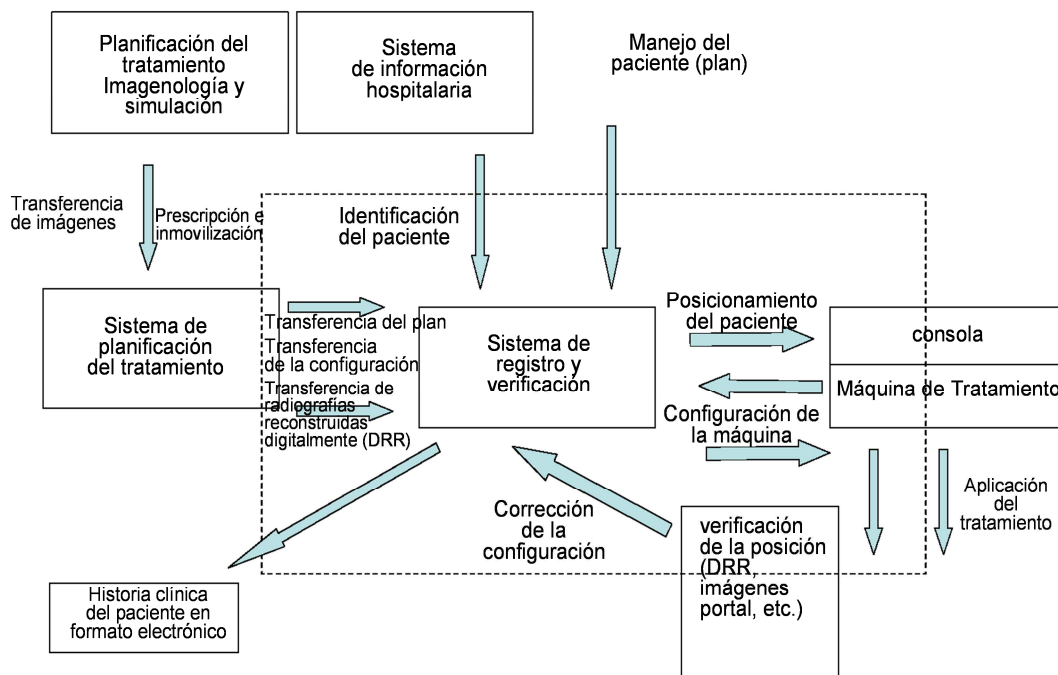


Fig. E.2. Ilustración de intercambios de datos típicos entre el SRV y otras piezas de equipo de un departamento de radioterapia moderno. Distintos fabricantes podrán proponer diferentes soluciones y ofrecen una mayor o menor integración de los diversos componentes.

E.2.2. Tendencias actuales en el tratamiento del cáncer con radioterapia

162. El objetivo prioritario de la práctica de radioterapia ha sido el tratamiento certero de los tumores evitando en la mayor medida posible afectar a los tejidos normales. Durante los dos últimos decenios, la capacidad para alcanzar este objetivo ha mejorado considerablemente. Este logro ha sido posible gracias a los avances en la tecnología de obtención de imágenes, específicamente al desarrollo de la

tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (MRI), la tomografía por emisión de positrones (PET) y la fusión PET/TC.³⁸

163. Los adelantos en materia de tecnología de obtención de imágenes sumados a los progresos de la tecnología informática han modificado de manera fundamental los procedimientos para el tratamiento de los tumores y la planificación de la radioterapia. La posibilidad de presentar visualmente información anatómica con una selección infinita de puntos de vista ha propiciado el nacimiento de la radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT), modalidad en la que el volumen tratado se ajusta con precisión a la forma del volumen del tumor.

164. La **radioterapia de intensidad modulada (IMRT)** asigna intensidades no uniformes a subdivisiones diminutas de haces denominadas “beamlets”. La capacidad de manipular de manera óptima las intensidades de cada uno de los rayos que componen un haz permite un control considerablemente mayor de la fluencia de radiación general (es decir, el número total de fotones/partículas que atraviesan un determinado volumen por unidad de tiempo). Esto, a su vez, permite el diseño individualizado de las distribuciones de dosis óptimas. La mejora de las distribuciones de dosis suele traducirse en una mejora del control del tumor y una reducción de la toxicidad en el tejido normal.³⁹

165. La **radioterapia guiada por imágenes (IGRT)** se puede definir como la tecnología orientada a aumentar la precisión de la radioterapia mediante la obtención frecuente de imágenes del blanco y/o los tejidos sanos justo antes del tratamiento y la posterior adaptación del tratamiento sobre la base de esas imágenes. Hay disponibles varias opciones para guiar imágenes: exploraciones de TC no integrada, obtención de imágenes por rayos X (kv) integrados, marcadores activos implantados, ultrasonidos, TC de capa única, TC convencional o TC de haz cónico integrada.⁴⁰

166. La **tomoterapia helicoidal (HT)** es una modalidad de radioterapia en la que la radiación se suministra capa por capa (de ahí el uso del prefijo griego tomo-, que significa “sección”). Este método se diferencia de otras formas de teleterapia en que todo el volumen del tumor es irradiado al mismo tiempo.⁴¹ La principal ventaja de este método es el relativamente corto período de irradiación total.

167. La **arcoterapia volumétrica modulada (VMAT)** es una técnica que permite administrar una distribución de dosis esculpida con precisión en tres dimensiones mediante una sola rotación de 360 grados del anillo del acelerador lineal.⁴² Esto es posible gracias a un algoritmo de planificación del tratamiento que modifica simultáneamente tres parámetros durante el tratamiento: la velocidad de rotación del anillo, la forma de la apertura mediante el movimiento del colimador multiláminas y la tasa de dosis.

168. La **radioterapia estereotáctica (SRT)**, también denominada “radiocirugía”, aunque no comporta ninguna cirugía, consiste en administrar una dosis de radiación relativamente alta a un volumen pequeño utilizando una técnica precisa de localización estereotáctica. El componente estereotáctico de esta técnica se refiere a la inmovilización o fijación del paciente mediante un marco rígido colocado en la cabeza que

³⁸ VIKRAM, B., COLEMAN, C.N., DEYE, J.A., Current status and future potential of advanced technologies in radiation oncology: challenges and resources. *Oncol* 23 3 (2009) 279.

³⁹ GALVIN, J.M., EZZEL, G., EISBRUCH, A., et al., Implementing IMRT in clinical practice: a joint document of the American Society for Therapeutic Radiology and Oncology and the American Association of Physicists in Medicine, *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 58 5 (2004) 1616–34.

⁴⁰ VAN HERK, M., Different styles of image guided radiotherapy, *Seminars in Radiation Oncology*, 17 4 (2007) 258-267.

⁴¹ ROCK MACKIE, T., et al., Tomotherapy; a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy. *Med Phys* 20 6 (1993) 1709-1719.

⁴² OTTO, K., Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med Phys* 35 1 (2008) 310.

establece un sistema de coordenadas específico del paciente durante todo el proceso de tratamiento.⁴³ Esta modalidad suele utilizarse para el tratamiento de tumores intracraneales. Después de colocar el marco en la cabeza, generalmente mediante cuatro tornillos que penetran en el cuero cabelludo y quedan apoyados en la tabla externa del cráneo, se realiza un estudio por imágenes (TC, MRI) para localizar el volumen del blanco en relación con las coordenadas del marco de la cabeza.

169. La **radioterapia robótica** es un sistema de radiocirugía robótica sin marco. Los dos principales elementos de la radioterapia robótica son la radiación producida por un pequeño acelerador lineal, y un brazo robótico que permite dirigir la energía hacia cualquier parte del cuerpo desde cualquier dirección.

170. La **braquiterapia (BT)** consiste en administrar radioterapia mediante la colocación de fuentes radiactivas en los tumores o en su proximidad, o bien en las cavidades corporales. Esta modalidad de terapia permite administrar altas dosis de radiación al tumor a nivel local y una rápida caída de la dosis en los tejidos normales que lo rodean. En el pasado, la braquiterapia se realizaba mayoritariamente con fuentes de radio o radón. En la actualidad, el uso de radionucleidos producidos artificialmente como el cesio 137, el iridio 192, el oro 198, el yodo 125 y el paladio 103 está aumentando rápidamente.

171. **Radioterapia adaptada a la respiración.** Los radiooncólogos se enfrentan a problemas específicos cuando tratan partes del cuerpo en las que los órganos y los tumores pueden moverse durante el tratamiento. El movimiento del blanco debido a la respiración o por cualquier otro motivo durante el tratamiento aumenta el riesgo de errar la zona objetivo o administrarle una dosis inferior a la prevista. Puesto que la administración de dosis de radiación es cada vez más precisa, los movimientos de los órganos y tumores constituyen un factor importante que influye en la precisión con la que se administra la dosis. Esto es particularmente notable en el caso de los tumores localizados en el tórax, que se mueven con la respiración. El movimiento no solo es un problema en el caso de los tumores localizados en el tórax; en general, los situados en la laringe, el abdomen (hígado), la próstata y la vejiga, así como en la pelvis, también se mueven durante y entre las administraciones del tratamiento.

172. **PET en la planificación del tratamiento de radioterapia.** En los últimos años se ha observado una tendencia creciente a utilizar la PET y la PET/TC para obtener imágenes en oncología. Junto con el diagnóstico, la determinación de la fase en que se encuentra la enfermedad, la detección de recurrencias y el seguimiento, una de las principales aplicaciones de la PET/TC es la evaluación de la respuesta al tratamiento y la planificación del tratamiento. La PET aporta información molecular sobre el microentorno del tumor (“imágenes funcionales”), además de imágenes anatómicas. En consecuencia, resulta muy beneficioso integrar los datos de la PET en la planificación del tratamiento de radioterapia. El uso de imágenes funcionales para delinear mejor el blanco del tratamiento es un buen ejemplo de tratamiento individualizado. De hecho, en lugar de utilizar un campo o conjunto de campos previamente establecidos, la dosis de radiación se configura en relación con el tumor de cada paciente.⁴⁴

173. **Terapia con partículas: haz de protones e iones pesados.** Se observa un uso cada vez mayor de la terapia con partículas en la esfera de la radiooncología y un interés creciente por la aplicación de la terapia con haz de protones. Según los datos del Grupo Cooperativo de Terapia de Partículas, en marzo de 2010 había en funcionamiento en todo el mundo 30 centros de terapia con protones, y más de 67 000 pacientes habían recibido esta modalidad de tratamiento. Se proyecta que el número de centros de protones en funcionamiento se duplique en el futuro próximo.

174. Los recientes avances tecnológicos en la esfera de la radiooncología han permitido mejorar las distribuciones de dosis y reducir la toxicidad en determinadas localizaciones de tumores, lo que, a su

⁴³ BOURLAND, J.D., “Stereotactic radiosurgery”, Clinical Radiation Oncology, 2ª ed. (GUNDERSON, L.L., TEPPER, J., eds.), Elsevier Churchill Livingstone, (2007) 151 cap. 6.

⁴⁴ CHITI, A., KRIENKO, M., GREGOIRE, V., Clinical use of PET-CT data for radiotherapy planning; What are we looking for? Radiat Oncol 96 (2010) 277-279.

vez, puede aumentar las posibilidades de controlar un tumor local, así como las tasas de curación. Esta es una de las razones por las que estos tratamientos han ganado popularidad entre los radiooncólogos y los gerentes de hospitales. Sin embargo, los mayores ingresos procedentes de la IMRT y otras tecnologías nuevas pueden llevar a su sobreutilización. Las pruebas científicas clínicas en relación con el control de tumores locales y la supervivencia general al cáncer en el caso de la mayoría de localizaciones de tumores no son, por lo general, concluyentes en el momento actual.

175. El OIEA, a través de su Programa de acción para la terapia contra el cáncer, y en cooperación con sus asociados, entre ellos la Organización Mundial de la Salud, sigue llevando el control integral del cáncer a los Estados Miembros. En 2011 se realizaron ocho misiones integradas del PACT (imPACT) para evaluar las capacidades y las necesidades nacionales en relación con distintos componentes del control integral del cáncer en Argelia, Bolivia, Colombia, Filipinas, Lesotho, Nigeria, el Paraguay y Uganda. Todos menos uno de los ocho sitios modelo de demostración del PACT (Albania, Ghana, Nicaragua, Mongolia, Sri Lanka, Tanzania, Viet Nam y el Yemen) han recibido una misión de seguimiento del PACT y sus asociados en relación con las recomendaciones sobre un enfoque integral de control del cáncer a través de asociaciones.

E.2.3. Diagnóstico por imágenes y tratamiento del cáncer de mama⁴⁵

176. Aunque la incidencia del cáncer de mama (expresada como tasa normalizada por edad) es casi tres veces más alta en los países desarrollados que en los países en desarrollo, este es el tipo de cáncer más común entre las mujeres independientemente del nivel socioeconómico de los países. La mortalidad está aumentando, especialmente en las regiones del mundo que no tienen programas de detección temprana. La edad, los antecedentes familiares y la genérica, así como el primer embarazo a edad avanzada y la obesidad, son factores de riesgo claramente definidos en el caso del cáncer de mama. La imagenología desempeña una función fundamental en las pruebas de detección del cáncer de mama, así como en la clasificación y definición del alcance de los tumores mamarios.

177. La mayoría de los cánceres de mama se detectan mediante mamografía por rayos X, generalmente como parte de los programas de detección realizados a escala nacional. El examen por ultrasonido se utiliza habitualmente como complemento esencial del examen físico y la mamografía en la evaluación de masas mamarias sospechosas/equívocas. El ultrasonido también se ha convertido en la opción preferida en el caso de los procedimientos de intervención percutáneos guiados realizados en masas mamarias, desde la biopsia por punción con aguja gruesa hasta la ablación. Las imágenes por resonancia magnética (IRM) con medio de contraste desempeñan un papel importante en la determinación de la malignidad o benignidad de masas mamarias detectadas en mamografías equívocas, así como en la definición de la extensión local de la enfermedad maligna

178. Además de las imágenes radiológicas (mamografía, ultrasonografía e IRM), las técnicas de formación de imágenes en medicina nuclear desempeñan una creciente función complementaria en el diagnóstico y la caracterización de lesiones mamarias, particularmente cuando se utilizan dispositivos especiales para la obtención de imágenes mamarias, tanto en el caso de la escintimamografía convencional, pero sobre todo en el de la tomografía por emisión de positrones (PET). Los procedimientos con radionucleidos son esenciales para la cirugía radioguiada en pacientes con cáncer de mama, ya sea como localización radioguiada de lesiones ocultas (ROLL) o como biopsia radioguiada del ganglio linfático centinela en la fase del tratamiento primario. La PET de cuerpo entero también es de vital importancia para la estadificación sistémica, la reestadificación tras la terapia neoadyuvante del cáncer de mama localmente avanzado y la evaluación de la eficacia de la terapia antitumores.

⁴⁵ Se puede consultar información adicional en el anexo correspondiente del *Examen de la tecnología nuclear – 2012* en el sitio web GovAtom/Conferencia General.

179. El cáncer de mama es tratado habitualmente mediante una combinación de cirugía, radioterapia, quimioterapia y terapia hormonal. La selección del tratamiento se basa en factores de pronóstico clínica y patológica, que comprenden la fase de la enfermedad en el momento del ingreso, la histología y la diferenciación del tumor, la edad y el estado menopáusico, la presencia o ausencia de receptores de estrógeno y/o progesterona, y una expresión excesiva del receptor del factor de crecimiento epidérmico de tipo 2 (*HER2/neu*).

180. En las primeras fases del cáncer de mama la radioterapia posoperatoria mejora el control del tumor local y la supervivencia. Por otra parte, las supervivientes al cáncer de mama tienen una probabilidad mayor de desarrollar complicaciones a largo plazo. Las manifestaciones de toxicidad cardíaca, como la aterosclerosis coronaria, la pericarditis, la cardiomiopatía, la enfermedad valvular, las anomalías de la conducción, etc., suelen producirse diez o más años después del tratamiento. Durante el último decenio, los adelantos en la tecnología de radioterapia contribuyeron a reducir la toxicidad del tratamiento del cáncer de mama. El uso de la radioterapia conformada tridimensional (3D CRT) permite administrar la dosis de radiación necesaria al volumen que se ajusta con precisión al volumen del tumor, sin que los órganos normales (por ejemplo, el corazón o los pulmones) se vean afectados.

181. La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) es un tipo avanzado de radioterapia conformada tridimensional que asigna intensidades no uniformes a subdivisiones diminutas de haces denominadas “beamlets”. La capacidad para manipular de manera óptima las intensidades de cada uno de los rayos que forman un haz (también denominada “diseño de la dosis”) permite una distribución ventajosa de la dosis: dosis alta al tumor y dosis baja a los órganos normales (corazón, pulmones, piel, etc.).

182. Otra técnica de radioterapia avanzada de alta precisión, que se aplica con éxito en la radioterapia del cáncer de mama, da respuesta al problema del movimiento del blanco debido a la respiración normal. Esta técnica tiene en cuenta la cuarta dimensión, el movimiento en el tiempo, por lo que también se puede denominar “radioterapia conformada cuatridimensional (4D CRT)”. Se trata de una radioterapia computarizada adaptada a la respiración en la que los movimientos del tórax son analizados y el haz de tratamiento se activa en sincronía con el ciclo respiratorio. Puede elegirse una fase respiratoria específica (inspiración o expiración) para la irradiación. Por consiguiente, el haz de radiación siempre abarcará el blanco y, al mismo tiempo, se evitará la exposición excesiva de órganos críticos debido a la reducción del margen de seguridad.⁴⁶

183. Para el tratamiento de irradiación parcial acelerada de la mama (APBI), en el que el lecho tumoral es tratado con una elevada dosis por fracción y el curso posoperatorio local completo concluye en cinco días o menos, la braquiterapia (BT) de alta tasa de dosis puede utilizarse conjuntamente con la teleterapia. La braquiterapia (BT) consiste en administrar radioterapia mediante la colocación de fuentes radiactivas en los tumores/lechos tumorales o en su proximidad, o bien en las cavidades corporales. Esta modalidad de terapia permite administrar altas dosis de radiación al tumor a nivel local y una rápida caída de la dosis en los tejidos normales que lo rodean. En el caso del cáncer de mama se puede aplicar la braquiterapia intersticial multicatéter o la braquiterapia intracavitaria utilizando un globo inflable.

184. El tratamiento del cáncer de mama localmente avanzado (tumor avanzado dentro de la mama de más de 5 cm o que está invadiendo la piel o la pared torácica, o tumor de cualquier tamaño con metástasis a nódulos regionales) aún representa un importante desafío^{47,48}. En el caso de enfermedades

⁴⁶ GIKAS, S.M., YORKE, E., Deep inspiration breath hold and respiratory gating strategies for reducing organ motion in radiation treatment, *Seminars in Radiat Oncol* **14** 1 (2004) 65-75.

⁴⁷ SINGLETARY S.E., ALLRED, C., ASHLEY, P., et al., Revision of the American Joint Committee on Cancer Staging System for breast cancer. *J Clin Oncol* 2002; **20** (17): 3628-3636.

⁴⁸ GREENE, F.L., PAGE, D.L., FLEMING, I.D., et al (eds), *AJCC Cancer Staging Manual*, 6^a ed., 2002; Nueva York, NY, Springer-Verlag.

operables (cuando el tumor y los nódulos no están fijados y no hay metástasis lejanas, por ejemplo, a los huesos, el cerebro, el hígado, etc.), el tratamiento consiste en una combinación de cirugía, quimioterapia y/o terapia hormonal, y radioterapia. Las ventajas de cada modalidad han sido demostradas en amplios ensayos aleatorios^{49,50,51,52}. Incluso cuando se administra quimioterapia adyuvante, existe un considerable riesgo de recurrencia locoregional después de la pertinente cirugía. Los factores de riesgo para el fallo locoregional incluyen la edad, el tamaño del tumor, el estado premenopáusico, el número de ganglios linfáticos positivos y la administración de terapia sistémica. Aunque se ha notificado que el tiempo que transcurre hasta la recurrencia locoregional puede ser tan solo de entre 3 y 12 meses⁵³, la mayoría de los casos de recurrencia locoregional se producen a los tres años.

185. El OIEA está realizando un estudio en el marco de un proyecto coordinado de investigación (PCI E33025) sobre pacientes con cáncer de mama que se sometieron a mastectomía y necesitan radioterapia posoperatoria. Este ensayo clínico compara dos esquemas de radioterapia distintos con el fin de investigar si se puede evitar o no la irradiación de la zona supraclavicular. Dado que la investigación clínica del OIEA tiene por objetivo las posibles ventajas de las estrategias de economización de recursos, en este estudio se utilizó un fraccionamiento que acorta a tres semanas la duración total del tratamiento de radioterapia, frente a las cinco semanas del fraccionamiento convencional. Este enfoque permitiría a los atareados departamentos de radioterapia con largas listas de espera emplear protocolos basados en hechos constatados que prevén tratamientos más cortos o más sencillos.

F. Medio ambiente

F.1. La aplicación rápida de métodos radioanalíticos puede tener una influencia decisiva en la evaluación de la contaminación radiactiva en situaciones de emergencia

186. El accidente de Fukushima demostró que puede darse la situación en que se deba analizar un número enorme de muestras ambientales en un lapso de tiempo muy breve, rebasando en gran medida los recursos humanos, materiales y logísticos de los laboratorios analíticos. Tal como muestra la gran cantidad de datos “en tiempo real” que las autoridades japonesas notifican periódicamente, en esas

⁴⁹ TAGHIAN, A.G., JEONG, J.H., MAMOUNAS, E.P., et al, Low locoregional recurrence rate among node-negative breast cancer patients with tumors 5 cm or larger treated by mastectomy, with or without adjuvant systemic therapy and without radiotherapy: results from five national surgical adjuvant breast and bowel project randomized clinical trials. *J Clin Oncol* 2006; 24 (24): 3927-3932.

⁵⁰ TAGHIAN, A., JEONG, J., MAMOUNAS, E. et al., Patterns of loco regional failure in patients with operable breast cancer treated by mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen and without radiotherapy: results from five national Surgical Adjuvant breast cancer and Bowel Project randomized clinical trials. *J Clin Oncol* 2004; 22 (21): 4247-4254.

⁵¹ NIELSEN, H.M., OVERGAARD, M., GRAU, C., JENSON, A.R., OVERGAARD, J., Study of failure pattern among high-risk breast cancer patients with or without postmastectomy radiotherapy in addition to adjuvant systemic therapy: long-term results from the Danish Breast Cancer Cooperative Group DBCG 82 b and c randomized studies. *J Clin Oncol* 2006; 24 (15): 2268-2275.

⁵² RECHT A., GRAY, R., DAVIDSON N.E., et al., Locoregional failure 10 years after mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen without irradiation: experience of the Eastern Cooperative Oncology Group. *J Clin Oncol* 1999; 17 (6): 1689-1700.

⁵³ ADENIPEKUN, A., CAMPBELL, O.B., OYESEGUN, A.R., ELUMELU, T.N., Radiotherapy of early breast cancer in Ibadan: outcome of chest wall irradiation alone in clinically nodes free axilla. *African Journal of Medicine & Medical Sciences* 2002; 31(4): 345 - 7.

situaciones es fundamental acelerar el tiempo de análisis y optimizar las estrategias analíticas para cumplir los límites cuantitativos reglamentarios y los criterios de calidad aceptados.

187. Tanto si se trata de emergencias nucleares, como de emisiones accidentales de diversas instalaciones nucleares o actos dolosos relacionados con un ataque radiológico, la prontitud con que se ponen a disposición de las autoridades los resultados de la evaluación de las emisiones y la contaminación ambientales puede tener efectos dramáticos en la seguridad de las personas y las poblaciones en riesgo. Los métodos que comúnmente se recomienda utilizar inmediatamente después de un incidente con posibles emisiones ambientales son la monitorización radiológica mediante mediciones de la tasa de dosis y métodos de análisis rápidos, como la monitorización de la radiactividad en aerosoles y gases y la elaboración de mapas de radiación. En muchos tipos de situaciones de accidente, la contaminación radiactiva ambiental puede evaluarse rápidamente mediante el empleo de técnicas de espectrometría gamma sobre el terreno, que incluyen el análisis *in situ* de la deposición, la elaboración de mapas de la contaminación del suelo utilizando unidades móviles, así como estudios de rayos gamma aéreos y subacuáticos. De esta manera se puede analizar un área extensa en un tiempo relativamente breve, se puede definir el alcance y nivel de la contaminación y se pueden optimizar las estrategias de muestreo.

188. En una etapa posterior de un suceso radiológico se deben realizar análisis más exactos y precisos de las muestras recogidas en función de protocolos validados, a fin de evaluar la exposición radiológica con mayor precisión. Una reconstrucción de dosis exhaustiva requiere el análisis de todo el espectro de radionucleidos, comprendidas las formas gaseosas, líquidas y de partículas, a partir de las primeras etapas de una emisión. Generalmente se realizan mediciones totales y espectrométricas alfa, beta y gamma de muestras a granel o procesadas por medios radioquímicos. El accidente de Fukushima puso de relieve la importancia de contar con laboratorios analíticos capaces de hacer frente a un aumento potencialmente elevado de sus cargas de trabajo. Los métodos rápidos permiten reducir de días o semanas a horas o días el tiempo necesario para el análisis. La validación y puesta en práctica de esos métodos son necesarias, ante todo, en el caso de radionucleidos que plantean gran preocupación desde el punto de vista radiológico en todos los medios ambientales que podrían verse afectados, así como, lo que es muy importante, en los alimentos y los piensos para animales.

189. El empleo de procedimientos de muestreo y análisis adecuadamente caracterizados y validados es especialmente importante en el caso de las evaluaciones ambientales transfronterizas en que participan varios laboratorios o redes de laboratorios y en que la comparabilidad de los resultados de las mediciones es una cuestión importante. El Organismo presta apoyo a los laboratorios y las redes de laboratorios de los Estados Miembros mediante la realización de actividades de capacitación, la ejecución de proyectos coordinados de investigación (PCI), el suministro de materiales de referencia en relación con una amplia gama de contaminantes, el desarrollo de la colaboración y la aplicación de técnicas analíticas, así como la organización de pruebas de aptitud y comparaciones entre laboratorios. La red ALMERA coordinada por el Organismo, que es una red mundial de laboratorios analíticos para mediciones de la radiactividad en el medio ambiente, consta de laboratorios designados por los Estados Miembros y está en condiciones de realizar análisis fiables y oportunos de muestras ambientales en el caso de una emisión accidental o intencionada de radiactividad.

190. La red ALMERA participa en actividades de colaboración encaminadas a la validación de métodos rápidos y continuará centrando sus esfuerzos en el análisis de radionucleidos y muestras de interés en situaciones de emergencia. La prueba de aptitud organizada en 2011 para la red ALMERA se centró en los emisores alfa, beta y gamma presentes en las muestras de suelo y agua. Se fijó un plazo breve de tres días, tras la recepción de las muestras, para la rápida notificación de los radionucleidos emisores gamma a fin de evaluar la capacidad de los laboratorios para realizar los análisis en condiciones de limitaciones de tiempo. En el futuro, el Organismo y los laboratorios de la red ALMERA elaborarán nuevos materiales de referencia y pruebas de aptitud con breves plazos de notificación a fin de abarcar de manera exhaustiva todos los requisitos planteados por las situaciones de emergencia. En 2012, la atención se centrará en la calidad y comparabilidad de los análisis de muestras de aerosoles.

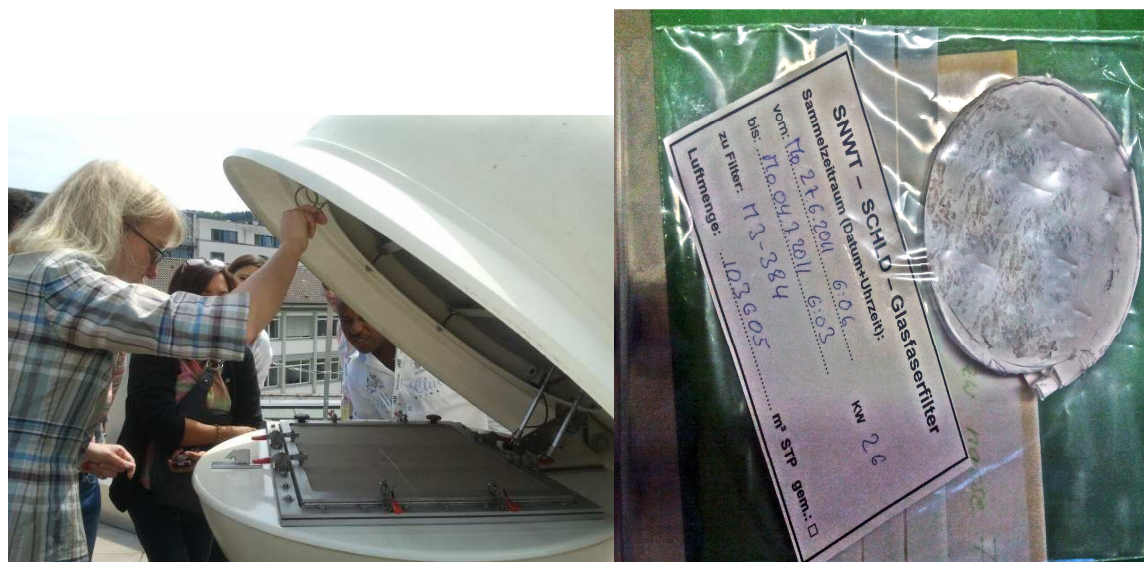


Fig. F.1. Demostración del colector de grandes volúmenes de aerosoles, de cuyo funcionamiento se encarga la Oficina Federal de Protección Radiológica en Salzgitter (Alemania), y del filtro de aerosoles compactados para su recuento inmediato por espectrometría gamma, organizada para los participantes en el “Curso interregional de capacitación avanzada del Organismo sobre radiactividad marina: técnicas analíticas y gestión de calidad”, acogido en 2011 por el Instituto de Tecnología de Karlsruhe.

191. El accidente de Fukushima también demostró que la transferencia de las funciones de análisis a los laboratorios en el marco de una red bien coordinada y la utilización de laboratorios móviles son soluciones adicionales que resultan útiles y requieren planificación por anticipado. Igualmente importante para el apoyo a la adopción de decisiones oportunas es un mecanismo rápido y fiable para la validación y notificación de los datos. La tecnología moderna de las comunicaciones móviles permite combinar sobre el terreno las virtudes de las bases de datos relacionales informatizadas, los sistemas de información geográfica, la documentación multimedia, el acceso en línea a los procedimientos y la asistencia operacional en apoyo de la confirmabilidad y calidad de los datos. La integración de la teledetección con las observaciones y los modelos hidrometeorológicos es fundamental para proporcionar orientación rápida en el momento de ajustar la estrategia de vigilancia, así como posteriormente, al preparar la respuesta de las autoridades. En comparación con la espectrometría gamma *in situ* aérea y terrestre para el muestreo ambiental, que es más común, una esfera que sin duda requiere desarrollo técnico es la monitorización submarina *in situ* del medio marino costero mediante espectrometría gamma de alta resolución con sistemas fijos y móviles, que permite la reconstrucción de emisiones radiactivas líquidas y la realización de un análisis rápido para detectar contaminación en el agua y los sedimentos.

G. Recursos hídricos

192. La demanda de agua en los sectores de la agricultura, la energía y la industria, así como para usos urbanos, continúa aumentando en todo el mundo. Junto con la preocupación cada vez mayor por el impacto en el ciclo hidrológico del cambio climático previsto, esa creciente demanda está ocasionando cambios importantes en la asignación y gestión de los recursos hídricos. En algunos lugares, la situación ha degenerado en conflictos debidos a las dificultades para proporcionar acceso al agua salubre, como se destaca en el informe sobre el Día Mundial del Agua 2011⁵⁴, en el que se trató

⁵⁴ Véase: http://www.unwater.org/downloads/World_Water_Day_2011_Final_Report_Web.pdf

el problema del acceso al agua en el contexto del desarrollo urbano. Teniendo en cuenta que ya se han asignado la mayoría de los recursos de aguas superficiales y/o que estas están cada vez más afectadas por la contaminación, se espera que las aguas subterráneas desempeñarán un papel aún más importante en un futuro cercano y suministrarán gran parte del agua dulce necesaria en el mundo. Desafortunadamente, la mayoría de los países no conocen suficientemente sus recursos de aguas subterráneas para poder asegurar un suministro adecuado de agua.

193. Para poder adoptar políticas adecuadas que faciliten el intercambio de los limitados recursos disponibles, es necesario tener acceso a información objetiva y completa sobre la disponibilidad y las condiciones de los recursos hídricos existentes. Los métodos isotópicos proporcionan información singular que puede utilizarse para evaluar los recursos de aguas subterráneas y elaborar mapas conexos con prontitud y eficacia. Las técnicas isotópicas y los instrumentos geoquímicos conexos, junto con nuevos avances en cartografía mediante el empleo de sistemas de información geográfica (SIG) y métodos geoestadísticos, están ayudando a los expertos en asuntos hídricos y los responsables de la gestión del agua a delinear, cuantificar y visualizar mejor la geometría, el volumen y las propiedades de los acuíferos y las masas de agua subterránea. Los mapas en los que se identifican las masas de agua más resistentes al cambio climático o las zonas de recarga activa son fundamentales para garantizar el acceso a los recursos hídricos a largo plazo.

G.1. Tendencias en el acceso a datos de isótopos estables

194. En 2011, el uso de dispositivos de bajo costo y fácil funcionamiento para el análisis de los isótopos estables presentes en el agua (oxígeno 18 y deuterio), sobre la base de la espectroscopia láser, pasó a ser el procedimiento estándar para los grupos de investigación de todo el mundo. Gracias a esta innovación, numerosos grupos de los países desarrollados y en desarrollo han logrado autonomía en el análisis de isótopos estables para estudios hidrológicos, evitando retrasos en la obtención de los resultados analíticos de laboratorios destacados y beneficiándose de la reducción de los costos. Por ejemplo, los estudios encaminados a evaluar los recursos de agua subterránea en la península de Santa Elena en el Ecuador (véase la fig. G.1) se están realizando de manera más eficaz gracias a la disponibilidad de un analizador de ese tipo. Para el año entrante se espera un desarrollo acelerado de nuevos analizadores del carbono 13 y nitrógeno 15 basados en la misma tecnología, lo que facilitará el uso de estos isótopos en el estudio de las aguas subterráneas y las aguas superficiales.



Fig. G.1. El mayor acceso a los recursos de agua subterránea en las comunidades de la zona costera del Ecuador es uno de los resultados de la mejora de los conocimientos científicos lograda en gran medida gracias a los datos obtenidos de los analizadores de isótopos estables (cortesía de ESPOL, Guayaquil (Ecuador)).

G.2. Datación de aguas subterráneas

195. Contrariamente a lo que sucede en el caso del equipo analítico utilizado para los isótopos estables, muchos Estados Miembros en desarrollo no cuentan con el equipo analítico necesario para medir los bajos niveles de actividad de los radionucleidos utilizados con frecuencia en la datación de las aguas subterráneas, lo que es importante para evaluar su sostenibilidad, vulnerabilidad a la contaminación y ritmos de recarga. Para adquirir estos conocimientos, generalmente se han utilizado radionucleidos ambientales, tales como el tritio o carbono 14. En los últimos años, varios adelantos analíticos han mejorado el análisis de estos isótopos (por ejemplo, el análisis del tritio utilizando los métodos de acumulación de ^3He y espectrometría de masas), pero el número de instalaciones sigue siendo limitado. Asimismo, para la datación de masas de agua subterránea recientemente recargadas, ahora se utiliza con más frecuencia el método basado en el tritio/helio 3, pero el acceso a las instalaciones analíticas capaces de financiar esta técnica también es limitado.

196. El uso de isótopos de gases nobles para datar aguas subterráneas de distintas épocas ha aumentado considerablemente en los últimos años, tendencia que sigue dándose, al igual que las investigaciones en esta esfera. Por ejemplo, instituciones como el Laboratorio Nacional de Argonne (Estados Unidos de América) y la Universidad de Heidelberg (Alemania) están desarrollando técnicas de análisis de trazas mediante captura de átomos (ATTA), gracias a las cuales se están abriendo nuevas posibilidades para datar aguas subterráneas mediante isótopos de gases nobles. En el caso de las aguas subterráneas recientemente recargadas (hasta 100 años), se está utilizando el criptón 85. Si se trata de recargas de aguas subterráneas de hasta 2000 años, también se ha empleado con éxito el argón 39. En el caso de grandes acuíferos en cuencas sedimentarias, como el Sistema de acuíferos de arenisca de Nubia (NSAS) en el norte de África y el sistema acuífero guaraní en Sudamérica, en los que la edad de las aguas subterráneas de esos acuíferos profundos puede llegar a un millón de años, se utilizan cada vez más radionucleidos de período largo, como el criptón 81⁵⁵, lo que permite mejorar los modelos de flujo y transporte de las aguas subterráneas. La hidrología isotópica ofrece la posibilidad de obtener la información requerida sobre las cantidades de agua disponibles, así como sobre la calidad del agua y la evolución prevista. El Organismo sigue desempeñando una función clave en el examen y la evaluación de estos nuevos instrumentos y metodologías, así como en la tarea de facilitar el acceso y la transferencia de tecnología a los Estados Miembros interesados.

H. Producción de radioisótopos y tecnología de la radiación

H.1. Radioisótopos y radiofármacos

H.1.1. Nuevos acontecimientos en la esfera de los radionucleidos para PET producidos por generador

197. Los avances en la obtención de imágenes en el ámbito nuclear siempre han estado estrechamente vinculados a la producción de nuevos radionucleidos con nuevas propiedades físicas y químicas. Los radionucleidos producidos por generadores para su uso en la PET son cada vez más accesibles porque pueden producirse en hospitales que no dispongan de un ciclotrón *in situ*. Actualmente se dispone de galio 68 (^{68}Ga) obtenido a partir de generadores comerciales de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ y se utiliza ampliamente en la formación de imágenes por PET. Se trata de un avance técnico importante ya que sería posible marcar péptidos biológicamente activos como el octreotido con ^{68}Ga , que es químicamente similar al lutecio 177

⁵⁵ Véase: <http://www.nytimes.com/2011/11/22/science/rare-krypton-81-isotope-helps-track-water-in-ancient-nubian-aquifer.html?src=dayp>

y al itrio 90 (dos radionucleidos utilizados cada vez más en la terapia contra ciertos tipos de cáncer), utilizando el proceso químico establecido mediante el enlace DOTA y utilizado para la localización de tumores neuroendocrinos por medio de exploraciones de diagnóstico, antes de la terapia. Sobre la base del éxito con el ^{68}Ga -DOTATATE, muchos investigadores están estudiando activamente las posibilidades de los nuevos péptidos marcados con ^{68}Ga para obtener imágenes de otros tipos de tumores. Un ejemplo es la bombesina, un péptido del que se sabe que tiene receptores en los tumores mamarios, de la próstata y pulmonares. La bombesina se ha marcado con ^{68}Ga y está siendo evaluada para determinar su utilidad en la formación de imágenes de esos tumores. Además del sistema generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$, en diversos centros de investigación se está llevando a cabo la producción de otros sistemas generadores de emisores de positrones que podrían ser interesantes, por ejemplo de titanio 44/escandio 44, selenio 72/arsénico 72 y neodimio 140/praseodimio 140.

H.1.2. Desarrollo de sistemas de síntesis basados en la microfluídica para trazadores de PET

198. Los métodos para marcar las biomoléculas con flúor 18 como trazadores inmuno-PET requieren una gran optimización de las condiciones de radiomarcado. Estos procesos tienden a utilizar grandes cantidades de biomoléculas que son escasas. Los sistemas de microfluidica utilizan pequeñas cantidades de fluidos que contienen ingredientes activos para la síntesis de radiofármacos para PET. Estos sistemas ofrecen muchas ventajas, como reacciones químicas más eficientes debidos a razones muy elevadas entre la superficie y el volumen, así como un control rápido y preciso de la temperatura. Otras ventajas son una producción de farmacéuticos muy controlada, flexible, repetible y fiable gracias a la automatización del proceso, y a unos componentes de microfluidos clave de bajo costo, intercambiables, desechables y de calidad asegurada. El cumplimiento de los requisitos de protección radiológica de un sistema de microfluidos es considerablemente menos caro debido a su pequeño tamaño. Estos sistemas también permiten una mejor utilización del espacio en un laboratorio. Los sistemas de microfluidos son especialmente eficaces cuando se esté considerando la posibilidad de utilizar biomoléculas que sean escasas y caras para el radiomarcado para PET.

199. Los chips recientemente creados de generación de gotas por microfluídica digital (DMDG) permiten llevar a cabo la medición y la mezcla, controladas por ordenador, de la marca de flúor 18, la biomolécula y el amortiguador en proporciones definidas. Esto posibilita eficazmente la rápida optimización de las condiciones de reacción en volúmenes de nanolitros, que posteriormente pueden traducirse al marcado con flúor 18 a escala de banco de fragmentos de anticuerpos genomanipulados de tipos específicos de cáncer. Estas técnicas, de las que se dispuso a partir de 2011, incidirán considerablemente en las investigaciones preclínicas y las aplicaciones clínicas de los nuevos trazadores para PET y, en particular, de los trazadores para inmuno-PET cuando se dispone de pequeñas cantidades de las biomoléculas esenciales. Varios fabricantes en todo el mundo están desarrollando nuevos métodos de marcado con flúor 18 mediante tecnologías de síntesis radioquímica basada en la microfluídica.

H.1.3. Ciclotrones multipartículas para la producción de isótopos

200. Una tendencia que se pudo observar en 2011 fue que varios fabricantes mejoraron sus sistemas de ciclotrón para aumentar la corriente y las energías del haz con el fin de satisfacer la demanda actual de radionucleidos que se utilizan en las aplicaciones clínicas de la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT), la PET y las terapias. El desarrollo de nuevos ciclotrones versátiles multipartículas de producción de isótopos capaces de acelerar protones, deuterones, helio 3 y partículas alfa con altas intensidades es una nueva tendencia en la tecnología de ciclotrón que posibilita utilizar haces distintos de los de protones para producir cantidades razonables de radionucleidos. Los haces de rayos alfa pueden utilizarse para producir nuevos isótopos terapéuticos como el ástato 211 emisor de partículas alfa y el cobre 67 emisor de partículas beta. Si bien teóricamente cada radionucleido puede producirse siguiendo distintas vías nucleares, la reacción (p, n) en un isótopo blanco enriquecido es la más eficaz. La llegada de los ciclotrones multipartículas ampliará la gama de radionucleidos y brindará nuevas vías para poner a disposición radionucleidos de interés cuya disponibilidad es actualmente limitada. Por ejemplo, el

cobre 64, el yodo 124 y el itrio 86, cuyo uso está comprobado, y los nuevos radionucleidos como el cobalto 55, el bromo 76, el circonio 89, el rubidio 82m, el tecnecio 94m, el yodo 120, etc, pueden producirse mediante las reacciones (p, n), (p, α) o (d, n) de baja energía. La producción de radionucleidos como el hierro 52, el selenio 73 y el estroncio 83 utilizando protones o deuterones de energía intermedia debe ser objeto de estudio especial desde el punto de vista del procesamiento químico posterior.

H.2. Aplicaciones de las tecnologías de la radiación

H.2.1. Prometedora vacuna irradiada con rayos gamma en la lucha contra la malaria

201. La malaria es una enfermedad parasítica que puede resultar mortal y afecta a millones de personas del mundo entero. Aunque los procedimientos de vacunación basados en vacunas con virus vivos atenuados han tenido éxito en el caso de varias enfermedades infecciosas - entre ellas la poliomielitis, la fiebre amarilla, el sarampión y la viruela - el desarrollo de una vacuna eficaz contra el *Plasmodium falciparum*, el parásito más letal de la malaria, sigue siendo uno de los grandes desafíos de la medicina moderna.

202. En la más reciente Reunión Internacional sobre tratamiento por irradiación (IMRP-2011), que se celebró en Montreal (Canadá) en junio de 2011, investigadores de Sanaria Inc., el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) y Protein Potential notificaron el desarrollo de una vacuna muy eficaz basada en un esporozoito atenuado por la radiación que impide la fase de infección de la sangre en la malaria, protegiendo a la persona de la enfermedad y bloqueando asimismo la transmisión ésta. La vacuna en cuestión se compone de esporozoitos de *Plasmodium falciparum* atenuados que no se duplican y que son metabólicamente activos producidos por irradiación gamma. Se ha superado con éxito el desafío que supone fabricar cantidades suficientes de la vacuna que cumplan las normas reglamentarias para los ensayos clínicos iniciales. Se han alcanzado objetivos importantes, como el establecimiento de una dosis de radiación que atenúe todos los parásitos sin disminuir la potencia, y la elaboración de una metodología y un sistema de monitorización radiológicas que cumplan plenamente todas las buenas prácticas actuales de fabricación establecidas por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos. Se ha finalizado un ensayo de la fase 1 de la vacuna en la que han participado 80 voluntarios y se ha demostrado su eficacia. Actualmente la vacuna se encuentra en una fase avanzada de los ensayos clínicos y podría sustituir a vacunas existentes con una incidencia relativamente elevada de complicaciones.

H.2.2. Las membranas con injertos por radiación ayudan a limpiar el agua contaminada de la zona de Fukushima

203. El tsunami provocado por el grave terremoto que tuvo lugar en el Japón en marzo de 2011 dañó el suministro eléctrico y detuvo la circulación del agua refrigerante del reactor nuclear de la central de Fukushima Daiichi. Como resultado de la fusión del reactor nuclear, se dispersaron materiales radiactivos por la zona circundante, incluidas varias masas de agua.

204. A fin de eliminar selectivamente el radiocesio de esas aguas contaminadas, se ensayó un absorbente polimérico fibroso, desarrollado por la Dirección Científica de Haces Cuánticos (QuBS) del Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) mediante un injerto por irradiación de un monómero adecuado en una tela no tejida de polietileno. Los absorbentes injertados, contenidos en una cápsula, se utilizaron para eliminar el radiocesio de un estanque en Iitate-Mura y de la piscina de una escuela en la ciudad de Fukushima. Ambos ensayos se llevaron a cabo con éxito. Otra ventaja de esta técnica es que no solo se elimina el radiocesio, sino que, como resultado de la retirada directa del componente tóxico, no se genera lodo, por lo que no se elimina la necesidad de realizar otras actividades de manipulación y purificación.



Fig. H.1. Utilización membranas con injertos para retirar el radiocésio del agua en la zona de Fukushima (fotografía por cortesía del JAEA Takasaki, Japón).

H.2.3. Tecnología de haces de electrones para producir bioetanol a partir de residuos agroindustriales

205. Según la reciente publicación de la Agencia Internacional de Energía (AIE), *Technology Roadmap: Biofuels for Transport*, para 2050 los biocombustibles podrían representar el 27% de todos los combustibles utilizados en el transporte, frente a solo el 2% en la actualidad.⁵⁶ De este modo se podrían reducir considerablemente las emisiones de CO₂ y al mismo tiempo aumentar la seguridad del suministro de energía, sin perjudicar a la seguridad alimentaria si se utilizan subproductos agroindustriales. Los biocombustibles convencionales, o de primera generación, se produjeron a partir de productos alimenticios, como el maíz y la caña de azúcar, mientras que los biocombustibles avanzados o de segunda generación se fabrican a partir de residuos agroindustriales, como la paja, las mazorcas de maíz y el bagazo de caña de azúcar. Un ejemplo de biocombustible es el bioetanol, cuyas propiedades son similares a las de la gasolina pero no contiene azufre, se degrada fácilmente y ofrece a los agricultores una fuente alternativa de ingresos distinta de los productos alimenticios. Otra ventaja de los biocombustibles de segunda generación como el bioetanol es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la gasolina: los estudios han mostrado que el etanol basado en la caña de azúcar permite una reducción de entre el 86 y el 90% de los gases de efecto invernadero si no se introducen cambios importantes en el uso de la tierra.

⁵⁶ Véase: http://www.iea.org/papers/2011/biofuels_roadmap.pdf.

206. La producción de biocombustibles avanzados se encuentra aún en la fase de desarrollo ya que se deben mejorar más la eficiencia de la conversión y la reducción de costos. En el caso de la producción de bioetanol a partir de fuentes de celulosa, uno de los desafíos es la hidrólisis enzimática de la celulosa, que es lenta y costosa.

207. En la Reunión Internacional sobre tratamiento por irradiación, celebrada en junio de 2011, se informó de que la hidrólisis térmica (40 minutos, 180°C) combinada con la irradiación por haces de electrones (50kGy) del bagazo de caña de azúcar dio lugar a una reducción de la cantidad de oligosacáridos formados por la descomposición parcial de la celulosa y la hemicelulosa. Las actividades realizadas previamente por grupos de investigación de Brasil, Estados Unidos de América, Japón y República de Corea indicaron que la irradiación por haces de electrones del bagazo de caña de azúcar con 30 kGy podían mejorar la hidrólisis enzimática de la celulosa en un 75% y aumentar el rendimiento del bioetanol.



Fig. H.2. Recolección de la caña de azúcar en el Brasil (foto cortesía del Instituto de Investigaciones Energéticas y Nucleares (IPEN), San Pablo (Brasil)).

H.3. Tecnologías de la radiación utilizadas en la extracción de minerales⁵⁷

208. Los radiotrazadores y las sondas nucleónicas se utilizan cada vez más en las actividades de extracción, principalmente para la prospección y explotación eficaz de los recursos naturales. Los radiotrazadores más fácilmente detectables se emplean en estudios no invasivos en las industrias de transformación, y las sondas nucleónicas se utilizan para la prospección de recursos. La gran penetración de los neutrones y los rayos gamma hace que las técnicas nucleares sean adecuadas para las aplicaciones de diagráfia de sondeos que, por lo tanto, se utilizan ampliamente en las industrias del petróleo, el gas y el uranio desde hace mucho tiempo. Estas técnicas se están comenzando a utilizar también en las industrias de la extracción de carbón y de minerales.

209. Además, diversos métodos de espectrometría nuclear se utilizan con éxito sobre el terreno y en entornos industriales para el análisis *in situ* de muestras. Los espectrómetros nucleares portátiles modernos permiten enormes ahorros de tiempo y trabajo sin comprometer los resultados, de forma similar a los que se obtienen con los instrumentos de laboratorio convencionales.

210. Las industrias de la extracción, la metalurgia y el procesamiento de minerales figuran entre los principales beneficiarios de estas técnicas y tecnologías. Debido a los atractivos beneficios que de ellas se derivan, el uso de radiotrazadores y de sondas nucleónicas en esas industrias va en aumento y está en constante evolución. Se están desarrollando y utilizando en la práctica nuevos radiotrazadores, programas informáticos de fácil uso, nuevos detectores y sistemas de adquisición de datos.

⁵⁷ Puede consultarse información adicional en el anexo correspondiente del *Examen de la tecnología nuclear – 2012* en el sitio web GovAtom/Conferencia General.