

Conferencia General

GC(58)/INF/4

17 de julio de 2014

Distribución reservada

Español

Original: Inglés

Quincuagésima octava reunión ordinaria

Punto 16 del orden del día provisional
(GC(58)/1, Add.1 and Add.2)

Examen de la tecnología nuclear – 2014

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 el que se destacan acontecimientos notables que se produjeron principalmente en 2013.
- En el Examen de la tecnología nuclear – 2014 se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, fisión avanzada y fusión, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, producción pecuaria y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, imaginología digital y telerradiología, tecnología de las radiaciones para el tratamiento de aguas residuales y biosólidos y de floraciones de algas nocivas. En el sitio web¹ del Organismo se encuentran, en inglés, otros documentos relacionados con el Examen de la tecnología nuclear – 2014 sobre la función de la gestión de los conocimientos nucleares y sobre la energía nucleoelectrica y el cambio climático.
- En el Informe Anual del OIEA para 2013 (GC(58)/3), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el Informe de cooperación técnica para 2013 (GC(58)/INF/5) 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/GC58/Documents/>.

Examen de la tecnología nuclear – 2014

Informe del Director General

Resumen

1. Con 434 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en todo el mundo al final de 2013, la energía nuclear tenía una capacidad mundial de generación de 371,7 GW(e). Hubo cuatro nuevas conexiones a la red y diez inicios de construcción de nuevos reactores. Belarús se convirtió en el segundo país que se incorpora al ámbito nuclear en 30 años que comenzó a construir su primera central nuclear. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia, especialmente en China. Los 72 reactores en construcción en 2013 representaron el mayor número desde 1989. De ellos, 48 estaban en Asia, así como 42 de los últimos 52 nuevos reactores que han sido conectados a la red desde 2000.
2. Treinta países utilizan actualmente la energía nucleoelectrica y un número similar estudia la posibilidad de incluirla como parte de su mezcla energética. De los 30 países que ya están explotando centrales nucleares, 13 están construyendo nuevas plantas o están finalizando activamente construcciones suspendidas con anterioridad, y 12 tienen previsto construir nuevas plantas o finalizar construcciones suspendidas.
3. La *Conferencia Ministerial Internacional sobre la energía nucleoelectrica en el siglo XXI* del OIEA celebrada en junio de 2013 reafirmó que la energía nucleoelectrica sigue siendo una opción importante para que muchos países puedan mejorar la seguridad energética, reducir el impacto de la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. En la declaración final se afirmó que “la energía nucleoelectrica es una fuente estable de electricidad de carga base en una era de constante aumento de la demanda mundial de energía, y complementa otras fuentes de energía, entre ellas, las renovables”. En las proyecciones del Organismo para 2013, se prevé que la energía nucleoelectrica registre un aumento de entre el 17 % como proyección baja y el 94 % como proyección alta para 2030. Esas cifras son ligeramente inferiores a las proyectadas en 2012 debido a los efectos aún presentes del accidente de Fukushima Daiichi, los bajos precios del gas natural y el uso creciente de la energía renovable. La información adicional se centra en los puntos de conexión entre la energía nucleoelectrica y el cambio climático, ya que de todas las fuentes de generación de electricidad, la energía nucleoelectrica, la hidroelectrica y la eólica son las que durante el ciclo de vida tienen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) más bajas.
4. La aplicación del Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear siguió siendo la base de las medidas adoptadas por los Estados Miembros, la Secretaría y otros interesados pertinentes para reforzar la seguridad. Se siguen introduciendo mejoras de la seguridad en las centrales nucleares, por ejemplo aplicando las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi. Esto ha contribuido a fortalecer el marco mundial de seguridad nuclear. Puesto que el intercambio y la transferencia de conocimientos es fundamental para la gestión segura y eficiente de cualquier actividad nuclear, se ha puesto a disposición información adicional sobre la gestión de los conocimientos nucleares.
5. Se prevé que las mejoras y las investigaciones constantes en la esfera de los reactores de fisión avanzada, como los reactores refrigerados por agua, los reactores rápidos y los reactores refrigerados por gas, contribuyan a hacer un uso más eficiente del combustible nuclear y a reducir el volumen de desechos radiactivos. Va en aumento el interés por los reactores de pequeña y mediana potencia y por el uso de centrales nucleares para aplicaciones no eléctricas como la desalación, el calor industrial, la calefacción urbana y la producción de hidrógeno.

6. Los precios al contado del uranio se mantuvieron en su punto más bajo de los últimos siete años, lo que limitó las posibilidades de que las compañías recaudaran fondos para realizar estudios de prospección y viabilidad, y esto repercutirá en la producción futura. Si bien se notificó la existencia de recursos adicionales en varios países, es probable que muchos de los proyectos previamente anunciados se vean retrasados.

7. La capacidad mundial de enriquecimiento de uranio siguió avanzando hacia tecnologías más eficientes energéticamente. En 2012 y 2013 se cerraron plantas de difusión gaseosa. Se realizaron progresos en proyectos sobre enriquecimiento por centrifugación y el enriquecimiento por láser ha avanzado hacia su comercialización.

8. Aunque la capacidad total de fabricación de combustible se ha mantenido en un nivel relativamente constante, se prevé un incremento en los próximos años para satisfacer el aumento de la demanda proyectado.

9. Puesto que las instalaciones de disposición final de combustible gastado y de desechos de actividad alta no han entrado aún en funcionamiento, sigue aumentando la cantidad de combustible gastado almacenado. Se descargaron otras 10 000 t HM de combustible gastado del conjunto global de centrales nucleares, por lo que la cantidad total acumulada de combustible gastado descargada asciende a unas 370 500 t HM.

10. Están en funcionamiento en todo el mundo instalaciones de disposición final para todas las categorías de desechos radiactivos, salvo los desechos de actividad alta (HLW) y el combustible nuclear gastado declarado como desecho. Prosigue la concesión de licencias para la construcción de instalaciones de disposición final geológica en Finlandia, Francia y Suecia. También están avanzando en otros Estados Miembros la investigación y el desarrollo en relación con la disposición final de HLW y de combustible nuclear gastado.

11. Aún queda mucho por hacer en el ámbito de la clausura: a diciembre de 2013, 147 reactores de potencia de todo el mundo estaban en régimen de parada permanente, más de 400 reactores de investigación y conjuntos críticos, y varios cientos de otras instalaciones nucleares, como instalaciones de gestión de desechos radiactivos o del ciclo del combustible, habían sido clausuradas o estaban en proceso de desmantelamiento. Alrededor del 40 % de todos los reactores nucleares de potencia en funcionamiento tienen actualmente más de 30 años y aproximadamente el 7 % de ellos tienen más de 40. Si bien algunos pueden seguir en funcionamiento hasta los 60 años, muchos serán retirados del servicio en los próximos 10 a 20 años.

12. En 2013 se avanzó en las actividades de restauración de zonas afectadas por el accidente de Fukushima Daiichi. El Japón ha asignado una cantidad importante de recursos a la planificación y aplicación de actividades de restauración en amplias zonas contaminadas fuera del emplazamiento. Se realizaron esfuerzos especiales para posibilitar que las personas evacuadas regresaran a sus hogares. También se ha avanzado a buen ritmo en la coordinación de las actividades de restauración con las de reconstrucción y revitalización.

13. Con el avance de la construcción del ITER, el programa mundial de fusión magnética se está convirtiendo en un programa cada vez más centrado en la producción de energía de fusión a escala industrial. Muchos países están elaborando de manera independiente planes de programas y están iniciando nuevas actividades de I+D destinadas a demostrar que la energía de fusión está lista para ser comercializada. Colectivamente, esos planes y actividades constituyen un programa de “central de demostración de la fusión” (DEMO), pese a que no existe una visión única o coordinada de la hoja de ruta para demostrar la generación de electricidad a partir de la fusión.

14. Cada vez más Estados Miembros están interesados en elaborar programas sobre reactores de investigación, y algunos desean que su primer reactor de investigación sea el inicio de la infraestructura de ciencia y tecnología nucleares del país. Tres países están construyendo nuevos reactores de investigación, mientras que varios otros cuentan con planes oficiales o están estudiando la posibilidad de construir reactores nuevos. Los reactores de investigación más antiguos están siendo sustituidos por un número menor de reactores polivalentes, y se precisará un mayor grado de cooperación internacional para garantizar el acceso amplio a esas instalaciones y su uso eficiente.

15. En 2013 se plantearon nuevamente desafíos operacionales en instalaciones de procesamiento y reactores de investigación antiguos, pese a lo cual el suministro de molibdeno 99 (Mo 99) no se vio tan gravemente afectado como entre 2007 y 2010, debido a una mejor gestión de la demanda y diversificación del suministro. Australia y Sudáfrica siguen siendo los principales suministradores de Mo 99 obtenido a partir de fuentes distintas del UME. Sudáfrica siguió adelante con la conversión de sus procesos para utilizar exclusivamente UPE. Bélgica y los Países Bajos prosiguieron sus planes de conversión de sus procesos de producción a escala comercial de UME a UPE.

16. La República Checa, Viet Nam y Hungría se convirtieron en países sin combustible de UME después de que el combustible de UME gastado que poseían fuese repatriado a la Federación de Rusia.

17. La tecnología nuclear sigue contribuyendo considerablemente al logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Muchos Estados Miembros están convencidos de que la energía nucleoelectrica respondería a las preocupaciones relativas al cambio climático mediante la reducción de las emisiones de carbono. Las tecnologías no eléctricas también hacen una aportación importante mediante programas y actividades de cooperación técnica en las esferas de la salud humana, la alimentación y la agricultura, la gestión de recursos hídricos, el medio ambiente marino y terrestre, la producción de radioisótopos y la tecnología de las radiaciones. Se hace un uso seguro y eficaz de la medicina nuclear y de las técnicas de radioterapia en la lucha contra una creciente epidemia mundial de cáncer que afectará de forma desproporcionada a los países en desarrollo en los próximos años. La erradicación de la pobreza y el hambre recibe el apoyo de la labor del OIEA en la esfera de la alimentación y la agricultura, en la que se utilizan las tecnologías nucleares para mejorar la gestión de los suelos y los recursos de la tierra, y para desarrollar variedades de cultivos que sobrevivan en suelos marginales o salinos y en condiciones duras. Se utilizan otras tecnologías para mejorar la producción y la salud del ganado, controlar las plagas de insectos que destruyen los cultivos y propagan enfermedades de los animales y los seres humanos, e irradiar de forma segura productos alimenticios a fin de proteger a los consumidores de la propagación de enfermedades transmitidas por los alimentos y reducir el deterioro de estos.

18. Sin la gestión sostenible de los recursos hídricos, no es posible el desarrollo agrícola sostenible. Las técnicas nucleares e isotópicas se utilizan para evaluar con precisión el volumen, la ubicación y el ritmo de recarga de los recursos hídricos, así como para detectar la contaminación de las aguas subterráneas, que es información fundamental para elaborar estrategias de gestión a largo plazo de los recursos hídricos. En la esfera de la sostenibilidad ambiental se utilizan la ciencia y las aplicaciones nucleares en la detección y el destino de radiocontaminantes en zonas oceánicas y costeras, el efecto de esos contaminantes en los organismos marinos, y la evaluación de procesos clave del ciclo del calor y el carbono marinos y los efectos del cambio climático. El uso de tecnologías de las radiaciones en el tratamiento de los efluentes industriales y de aguas residuales y el lodo ayuda a conservar los recursos hídricos y a mejorar las condiciones del suelo, que contribuyen a su vez a la sostenibilidad ambiental. Varias de estas tecnologías nucleares se analizan más detenidamente en el presente Examen de la tecnología nuclear.

19. A medida que aumenta la población humana, también lo hace la demanda de suficientes alimentos; a su vez, se incrementa la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) generados en la cadena de producción de alimentos, especialmente en relación con el ganado. Las tecnologías nucleares

y de la esfera nuclear innovadoras pueden desempeñar una función singular en la nutrición, la salud, la reproducción y la cría de los animales, contribuyendo así a la seguridad alimentaria sostenible al mismo tiempo que mitiga el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de GEI.

20. Se emplean diversas técnicas nucleares para estudiar la absorción y utilización de proteínas microbianas, así como para desarrollar mejores cultivos forrajeros con miras a mejorar el índice de conversión de piensos y la utilización de energía y, de ese modo, en combinación con un conjunto de buenas prácticas, como una mejor gestión del pastoreo, reducir los GEI. Es posible aumentar la productividad pecuaria mediante el uso de progesterona marcada con yodo 125 en radioinmunoanálisis (RIA) para identificar a animales preñados en los ganados productores de leche, lo cual se puede aplicar para reducir la proporción de animales no productivos que participan en la reproducción. Las técnicas nucleares también ayudan a caracterizar genomas del ganado, lo cual facilita la identificación de rasgos genéticos ventajosos, como los que dan resistencia a las enfermedades o la capacidad de crecimiento en condiciones de estrés climático o nutricional.

21. El Programa de acción para la terapia contra el cáncer (PACT), un programa emblemático del Organismo, pasó a formar parte del Departamento de Cooperación Técnica (TC) a partir de 2014 y se convirtió en una división. El objetivo de esta nueva iniciativa es aumentar más la eficacia y eficiencia en la ejecución del programa. El PACT se centrará en la movilización de recursos y la recaudación de fondos para actividades relacionadas con el control del cáncer; el desarrollo de nuevos productos y servicios relacionados con el control del cáncer y la mejora de los existentes para satisfacer las necesidades de los Estados Miembros (como las misiones de examen del PACT, VUCCnet, sitios modelo de demostración del PACT); y el establecimiento e intensificación del enlace con los asociados, haciendo hincapié en la naturaleza complementaria de sus respectivos mandatos, en particular la Organización Mundial de la Salud (OMS).

22. La imaginología por rayos X es uno de los instrumentos más potentes en la práctica médica, con un amplio espectro de aplicaciones de diagnóstico, entre ellas la detección y estadificación del cáncer. Además, se utilizan modalidades de imaginología múltiple para elaborar planes de tratamiento en radioterapia y se aplican técnicas nucleares para mejorar el manejo del cáncer a escala mundial. En el campo de la radiología médica crece constantemente la demanda para pasar de la imaginología convencional (basada en películas) a la imaginología digital. Pese a las importantes ventajas de la imaginología digital, como una mayor fiabilidad y facilidad de uso, existen obstáculos para abandonar la radiología convencional, como los elevados costos de capital, incluidos los destinados al desarrollo de capital humano. El desafío general para los países en desarrollo es encontrar una metodología que se ajuste a sus necesidades y circunstancias para poder pasar eficazmente de los métodos de procesamiento y archivo de películas convencionales a sistemas digitales de adquisición y visualización de imágenes.

23. El empleo de la tecnología de imaginología digital en combinación con la telerradiología permite establecer un diagnóstico independientemente de la distancia entre el lugar en que se toma la imagen y el lugar en que se encuentra el médico. Por lo tanto, la telerradiología es un método eficaz para hacer frente al problema de la distribución geográfica desigual y la falta de especialistas en imaginología a nivel local. El papel cada vez más importante de la tecnología podría ayudar a paliar la falta de recursos humanos, aunque esta tecnología requiere unas redes de comunicación más sólidas, y se precisarán nuevas funciones de apoyo a la infraestructura técnica.

24. La urbanización e industrialización constantes de las sociedades en todo el mundo contribuyen a la contaminación de las reservas de agua dulce y a la generación de lodo de aguas residuales municipales. El tratamiento de efluentes industriales y de aguas residuales y lodo mediante el uso de tecnologías nucleares, como los aceleradores de haces de electrones, pueden ayudar a conservar los recursos hídricos y proteger la fauna y la salud pública, y a producir biosólidos fertilizantes para mejorar las condiciones

del suelo. Se ha demostrado que estas técnicas son eficaces para el tratamiento de las aguas residuales de los colorantes textiles industriales y el saneamiento de los lodos residuales con miras a proporcionar biosólidos de alta calidad destinados a aplicaciones agrícolas. A medida que se ha agravado la escasez de agua, ha aumentado el interés en todo el mundo por la reutilización del agua. Las tecnologías de las radiaciones, combinadas con los procesos de tratamiento convencionales, están siendo objeto de ensayos para producir agua de gran calidad destinada a la reutilización potable indirecta, y se prevé que lleguen a ser las tecnologías de tratamiento predominantes en un futuro cercano.

25. Los ecosistemas marinos son una fuente vital de alimento e ingresos para una parte importante de la población mundial. En algunas regiones, esos ecosistemas se ven amenazados periódicamente por las floraciones de algas nocivas (FAN). Se prevé que el cambio climático, junto con la actividad económica en expansión, traiga consigo un aumento de la frecuencia de esos episodios. Las toxinas de las algas son responsables, por ejemplo, de pérdidas económicas enormes para la industria del marisco debido a los cierres que se imponen a las instalaciones de captura cuando las toxinas presentes en el marisco sobrepasan los niveles reglamentarios. La frecuencia de episodios de FAN también va en aumento en los medios de agua dulce, lo que constituye una amenaza para las especies de agua dulce y el ganado, así como para los seres humanos. Las técnicas nucleares como el análisis de radiorreceptor son medios de eficacia demostrada para monitorizar eficazmente las toxinas de las algas en los alimentos marinos y en el medio ambiente, y para estudiar los efectos del cambio climático en las FAN y en el ecosistema marino en su conjunto. El análisis de radiorreceptor tiene una ventaja fundamental con respecto a métodos más convencionales, ya que es muy específico y muy sensible, por lo que proporciona a las autoridades reguladoras y a los productores alertas tempranas precisas en relación con la toxicidad de las FAN.

Examen de la tecnología nuclear – 2014

Informe principal

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad

1. A 31 de diciembre de 2013 había en funcionamiento 434 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en todo el mundo, con una capacidad total de 371,7 GW(e)² (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa una ligera disminución, de unos 1,6 GW(e) de la capacidad total, respecto a 2012. Se realizaron cuatro nuevas conexiones a la red en 2013: Hongyanhe 1 y 2 (1 000 MW(e)) y Yangjiang-1 (1 000 MW(e)) en China, y Kudankulam-1 (917 MW(e)) en la India.

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

² Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (a 31 de diciembre de 2013)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2013		Experiencia operacional total hasta 2013	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	9	12 068			92,1	15,4	799	1
ARGENTINA	2	935	1	692	5,7	4,4	70	7
ARMENIA	1	375			2,2	29,2	39	8
BELARÚS			1	1 109				
BÉLGICA	7	5 927			40,6	52,1	261	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	13,8	2,8	45	3
BULGARIA	2	1 906			13,3	30,7	155	3
CANADÁ	19	13 500			94,3	16	655	7
CHINA	20	15 977	29	28 774	104,8	2,1	160	0
COREA, REPÚBLICA DE	23	20 721	5	6 370	132,5	27,6	427	1
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS			2	2 690				
ESLOVAQUIA	4	1 815	2	880	14,6	51,7	148	7
ESLOVENIA	1	688			5,0	33,6	32	3
ESPAÑA	7	7 121			54,3	19,7	301	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	100	99 081	4	5 633	790,2	19,4	3912	4
FEDERACIÓN DE RUSIA	33	23 643	10	8 382	161,7	17,5	1 124	2
FINLANDIA	4	2 752	1	1 600	22,7	33,3	139	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	405,9	73,3	1932	3
HUNGRÍA	4	1 889			14,5	50,7	114	2
INDIA	21	5 308	6	3 907	30,0	3,5	397	6
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA	1	915			3,9	1,5	2	4
JAPÓN	48	42 388	2	1 325	13,9	1,7	1 646	4
MÉXICO	2	1 330			11,4	4,6	43	11
PAÍSES BAJOS	1	482			2,7	2,8	69	0
PAKISTÁN	3	690	2	630	4,4	4,4	58	8
REINO UNIDO	16	9 243			64,1	18,3	1 527	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 884			29,0	35,9	134	10
RUMANIA	2	1 300			10,7	19,8	23	11
SUDÁFRICA	2	1 860			13,6	5,7	58	3
SUECIA	10	9 474			63,7	42,7	412	6
SUIZA	5	3 308			25,0	36,4	194	11
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	78,2	43,6	428	6
Total ^{b, c}	434	371 733	72	69 367	2 358,9		15 660	7

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

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

6 unidades, 5 032 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2 600 MW(e) en construcción;

39,8 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 19,1 % del total de electricidad generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (194 años y 1 mes).

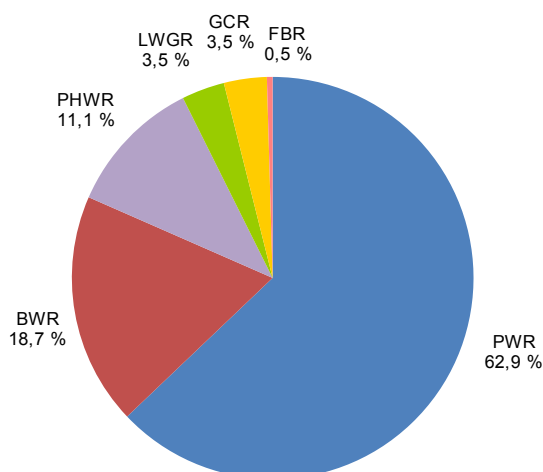


Fig. A-1. Distribución actual de los tipos de reactores. (BWR: reactor de agua en ebullición; FR: reactor rápido; GCR: reactor refrigerado por gas; LWGR: reactor refrigerado por agua ligera y moderado por grafito; PHWR: reactor de agua pesada a presión; PWR: reactor de agua a presión).

3. Aunque el número de construcciones de nuevos reactores iniciadas disminuyó de 16 en 2010 a cuatro en 2011, se comenzaron siete construcciones en 2012 y 10 en 2013 (figura A-2), lo que refleja una tendencia al alza desde el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Los trabajos de construcción comenzaron en Summer 2 y 3 y Vogtle 3 y 4 en los Estados Unidos de América, Tianwan-4 y Yangjiang-5 y 6 en China, Shin-Hanul-2 (antes llamado Shin-Ulchin-2) en la República de Corea, Barakah-2 en los Emiratos Árabes Unidos y Belarusian-1 en Belarús. Tras los Emiratos Árabes Unidos, que comenzaron la construcción de su primera central nuclear en 2012, Belarús es el segundo país que se incorpora al ámbito nuclear en 30 años que ha empezado a construir su primera central nuclear.

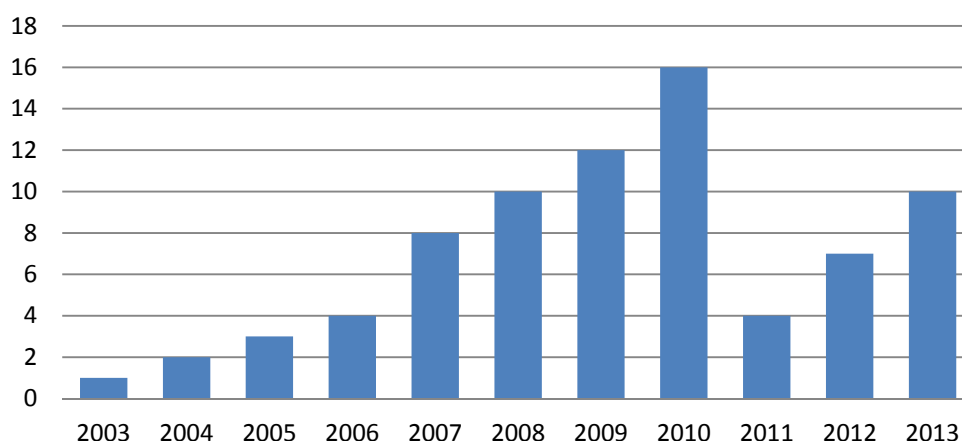


Fig. A-2. Tendencia de las construcciones de reactores de potencia iniciadas.

4. En 2013 se declaró oficialmente la parada permanente de seis reactores: Crystal River-3, Kewaunee y San Onofre 2 y 3, en los Estados Unidos, y Fukushima Daiichi 5 y 6, en el Japón. Aunque son tres paradas más que en 2012, esta cifra queda bastante lejos de las 13 de 2011. Además, se declaró en estado de “parada a largo plazo” un reactor en la central de Santa María de Garoña, en España.

5. A 31 de diciembre de 2013 había 72 reactores en construcción, la cifra más alta desde 1989. Como en años anteriores, la expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen centradas en Asia (véase la figura A-3), en particular en China. De estos 72 reactores en construcción, 48 están en Asia, así como 42 de los últimos 52 reactores nuevos que se han conectado a la red desde 2000.

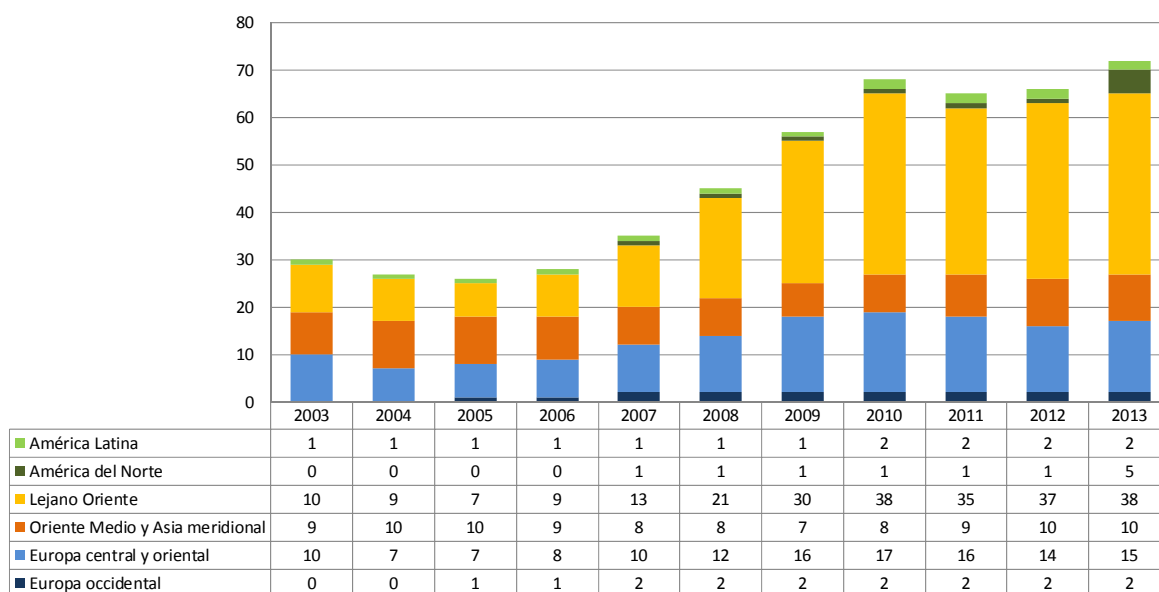


Fig. A-3. Número de reactores en construcción, por regiones.

6. En 2013 se mantuvo la tendencia a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de reactores en funcionamiento. La Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear concedió una prórroga de cinco años a las licencias de explotación de los seis reactores de agua pesada a presión de Pickering. La Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos aprobó aumentos de potencia para tres unidades: McGuire 1 y 2, y Monticello. El Cuerpo de Inspección Estatal de Reglamentación Nuclear de Ucrania concedió diez años de prórroga a la licencia de explotación de la Unidad 1 de la central nuclear de South Ukraine.

7. En 2013, varios países progresaron considerablemente en la construcción de sus primeras centrales nucleares. La Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos, en los Emiratos Árabes Unidos, comenzó el hormigonado de los cimientos de la segunda unidad del emplazamiento de Barakah en mayo de 2013. Está en curso el examen de la solicitud de licencia para la construcción de otras dos unidades. Se prevé que la primera de las cuatro unidades entre en funcionamiento a más tardar en 2017 y que las otras tres lo hagan antes de 2020.

8. Belarús comenzó el hormigonado de los cimientos de su primera unidad, Belarusian-1, en noviembre de 2013 (figura A-4). Se trata de la primera de las dos unidades de WWER-1200 que se construirán en virtud del contrato suscrito con Atomstroyexport, de la Federación de Rusia, en julio de 2012.



Fig. A-4. La construcción de la primera central nuclear de Belarús comenzó el 6 de noviembre de 2013 en el emplazamiento de Ostrovets. (Fotografía: Dirección de Construcción de Centrales Nucleares de Belarús).

9. Turquía sigue desarrollando su infraestructura para programas nucleoelectricos y preparándose para construir cuatro unidades de WWER-1200 en Akkuyu. En 2013, la empresa del proyecto de la central nuclear de Akkuyu presentó un informe de evaluación de los efectos en el medio ambiente correspondiente a ese proyecto. Turquía firmó un acuerdo de cooperación con el Japón para construir una segunda central nuclear en Sinop. La misión de Examen integrado de la infraestructura nuclear (INIR) del Organismo, llevada a cabo por en noviembre de 2013 (figura A-5), concluyó que Turquía había progresado en el desarrollo de su infraestructura nuclear y formuló recomendaciones sobre nuevas medidas.

10. Varios de los países que han decidido implantar la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de preparación de las infraestructuras. Tras suscribir en 2011 un acuerdo intergubernamental de cooperación con la Federación de Rusia para construir la central nuclear de Rooppur, que tiene dos unidades, Bangladesh emprendió los trabajos preparatorios en el emplazamiento en 2013. En octubre de 2013, Jordania seleccionó a Atomstroyexport, de la Federación de Rusia, como proveedor preferido y actualmente se ocupa de la caracterización del emplazamiento de Amra. Polonia prevé construir una o dos centrales nucleares. La misión INIR de marzo de 2013 concluyó que este país había realizado progresos y formuló recomendaciones sobre nuevas medidas. En 2013, Viet Nam llevó a cabo estudios de viabilidad en dos emplazamientos para centrales nucleares con una capacidad total de 4 000 MW en Ninh Thuan. Nigeria y Egipto siguen desarrollando su infraestructura para implantar la energía nucleoelectrica. Jordania, Nigeria y Marruecos han solicitado oficialmente misiones INIR, que se programarán en 2014. En enero de 2013, Sudáfrica se convirtió en el primer país con reactores nucleares en funcionamiento que recibió una misión INIR para evaluar su infraestructura nuclear como preparativo para otras construcciones previstas.

11. Varios países siguen estudiando si implantar la energía nucleoelectrica. Algunos se están preparando activamente para tomar decisiones fundamentadas sobre la posibilidad de ejecutar un programa nucleoelectrico y varios de ellos están elaborando sus estrategias energéticas de modo que incluyan la opción de la energía nucleoelectrica. De momento, el interés se centra en crear la amplia infraestructura jurídica y de reglamentación necesaria en la que se basarán los programas nucleoelectricos, además de formar los recursos humanos que se precisan.



Fig. A-5. Reunión de expertos internacionales y del Organismo con contrapartes de Turquía durante la misión INIR en el país, del 4 al 14 de noviembre de 2013. (Fotografía: Ministerio de Energía y Recursos Naturales (Turquía)).

12. De los 30 países con centrales nucleares en funcionamiento, 13 están construyendo centrales nuevas, como China, los Estados Unidos, la Federación de Rusia y la República de Corea, o finalizando activamente construcciones anteriormente suspendidas, como la Argentina, el Brasil y Eslovaquia. Otros 12 están planificando construir centrales nuevas, como Hungría, el Reino Unido, la República Checa y Sudáfrica, o finalizar construcciones suspendidas, como los Estados Unidos y Rumania.

13. Aunque, tradicionalmente, la industria nuclear ha tratado de aprovechar las economías de escala, existe un creciente interés en los reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP), en parte porque precisan inversiones menores y reducen los riesgos de las inversiones financieras. Actualmente hay en funcionamiento 130 RPMP en 26 países, con una capacidad total de 58,2 GW(e), y 14 de los 72 reactores en construcción son RPMP. Alrededor de 45 conceptos de RPMP innovadores se encuentran en fase de investigación y desarrollo. Este aspecto se aborda con más detalle en la sección B.1.4.

14. Si bien la producción de electricidad es la función principal de los reactores hoy en funcionamiento, varios de ellos también se utilizan con fines de desalación, producción de calor industrial y calefacción urbana (figura A-6). Otros posibles usos no eléctricos futuros comprenden la producción de hidrógeno para, en primer lugar, mejorar los recursos de petróleo de baja calidad, como las arenas bituminosas, y compensar al mismo tiempo las emisiones de carbono asociadas al reformado de metano con vapor; en segundo lugar, apoyar la producción a gran escala de combustibles líquidos sintéticos basados en la biomasa, el carbón u otras fuentes de carbono; y, en tercer lugar, servir directamente como combustible para vehículos, muy probablemente para vehículos utilitarios ligeros híbridos enchufables con pilas de hidrógeno. Si se utilizan para generar electricidad y para aplicaciones no eléctricas, es decir, para cogeneración nuclear, las centrales nucleares pueden ofrecer una serie de beneficios económicos a los grandes usuarios de energía, dado que la mayor eficiencia de estas centrales se traduce en mejores resultados económicos, menos emisiones de todos los tipos de contaminantes, mayor fiabilidad y calidad de la electricidad, mejor empleo del combustible nuclear y flexibilidad de la red eléctrica. En la sección B. 1. 6. se trata la cogeneración nuclear.

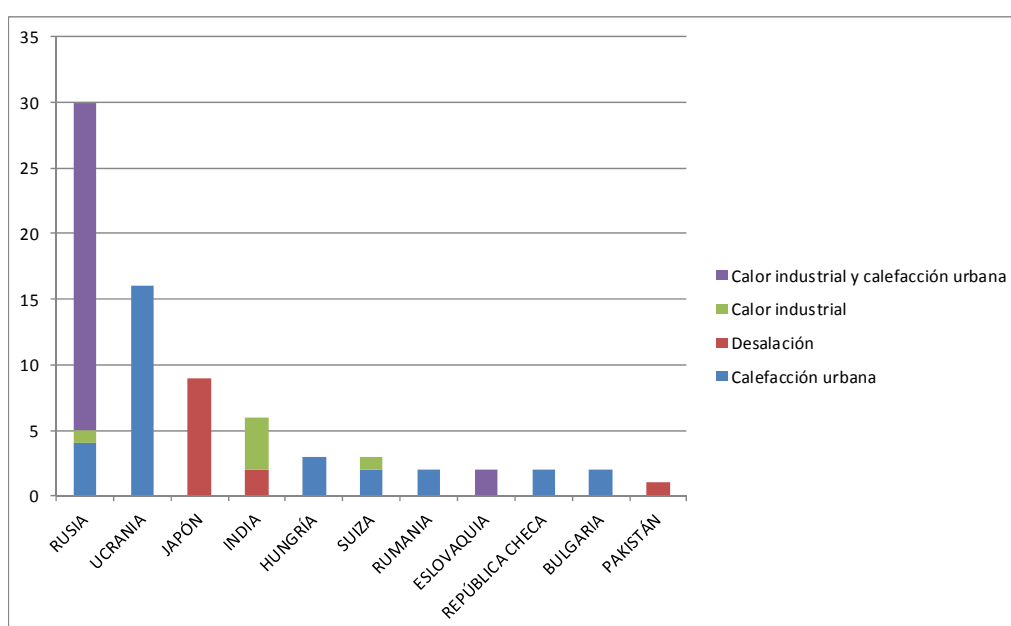


Fig. A-6. Número de reactores que se emplean con fines no eléctricos y para producir electricidad.

A.2. Las proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica

15. Treinta países han optado por la energía nucleoelectrica y un número similar de ellos estudia nuevamente la posibilidad de incluirla como parte de su mezcla energética porque encuentran interesantes sus beneficios a largo plazo. Uno de los mensajes fundamentales surgidos de la *Conferencia Ministerial Internacional sobre la energía nucleoelectrica en el siglo XXI* del OIEA, que se celebró en San Petersburgo en junio de 2013, fue que para muchos países la energía nucleoelectrica jugaría un papel importante en el logro de la seguridad energética y los objetivos de desarrollo sostenible. La energía nucleoelectrica, como fuente de energía con baja emisión de carbono, puede ayudar a los países a responder a la creciente demanda de electricidad, limitar las emisiones de carbono en respuesta a la preocupación por el cambio climático, reducir la inquietud con respecto a la seguridad del suministro de energía y limitar la dependencia de los combustibles fósiles, que están sujetos a disparidades y volatilidad de los precios a escala regional.

16. Las proyecciones del Organismo de 2013 prevén que para 2030 la energía nucleoelectrica crecerá entre un 17 % como proyección baja y un 94 % como proyección alta. Estas cifras son ligeramente inferiores a las previstas en 2012 y esto se interpreta como un reflejo de los efectos continuados del

accidente de Fukushima Daiichi, los bajos precios del gas natural y las crecientes capacidades en cuanto a energía renovable subvencionada.

17. En la proyección alta, la capacidad mundial total alcanzaría los 722 GW(e) en 2030, casi el doble de capacidad con respecto a los niveles de 2012. Esta estimación se basa en suposiciones optimistas pero plausibles sobre las tasas del crecimiento económico y de la demanda de electricidad, particularmente en el Lejano Oriente. En la proyección alta se da por supuesto que se modificarán las políticas nacionales relacionadas con el cambio climático y habrá un fortalecimiento de la economía mundial, lo que hará que más países incorporen la energía nucleoelectrica a su mezcla energética o amplíen las capacidades existentes.

18. En la proyección baja, la capacidad mundial total en la esfera nuclear crece hasta los 435 GW(e) en 2030, un aumento de apenas 62 GW(e) con respecto a los niveles de 2012. Esta estimación parte del supuesto de que se mantendrán las tendencias actuales del mercado, la tecnología y los recursos y que habrá pocos cambios en las leyes, las políticas y la normativa que favorezcan un mayor grado de adopción de la energía nucleoelectrica. En la proyección baja se refleja una pausa prolongada en algunos países o la decisión de no seguir el camino del desarrollo nuclear debido al accidente de Fukushima Daiichi.

19. El mayor crecimiento que se prevé corresponde a las regiones que ya tienen centrales nucleares en funcionamiento, con los países asiáticos, entre ellos China y la República de Corea, en primer lugar. Europa Oriental, que comprende Rusia, así como el Oriente Medio y Asia Meridional, que comprenden a la India y el Pakistán, también muestran un sólido potencial de crecimiento.

20. Otras evaluaciones indican también un crecimiento nuclear comparable a las proyecciones del Organismo. En el informe *World Energy Outlook 2013*, publicado por la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), se prevé que para 2030 la energía nucleoelectrica crecerá hasta los 513 GW(e) en el Escenario de Políticas Actuales, hasta los 545 GW(e) en el Escenario de Nuevas Políticas y hasta 692 GW(e) en el escenario más alto que limita el aumento mundial de la temperatura a 2° C. Esto sugiere que la proyección baja del OIEA es moderadamente conservadora, con una estimación para 2030 que es inferior en 78 GW(e) a la proyección más baja de la AIE.

21. En la figura A-7 se comparan las proyecciones de 2013 del OIEA, los escenarios de 2013 de la AIE, y las proyecciones de 2013 de la Asociación Nuclear Mundial (WNA) según el informe *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2013–2030*. Los escenarios altos de las tres organizaciones arrojan resultados similares.

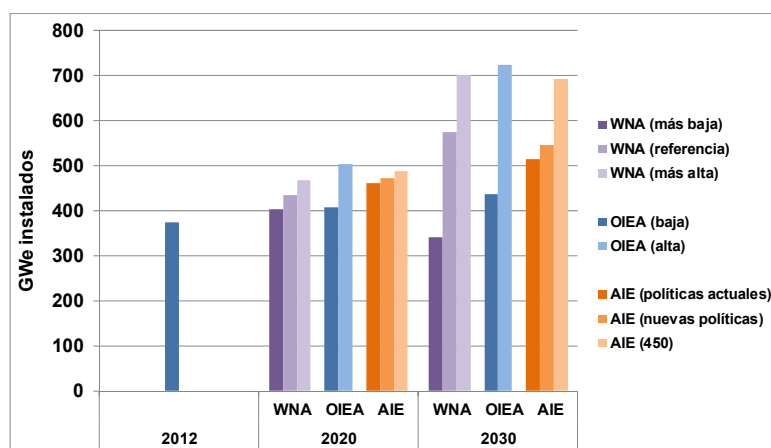


Fig. A-7. Comparación de las proyecciones sobre la energía nucleoelectrica del OIEA, la WNA y la AIE.

Energía nucleoelectrica: una tecnología con bajas emisiones de carbono³

De todas las fuentes de generación de electricidad, la energía nucleoelectrica, la hidroelectrica y la eólica son las que durante el ciclo de vida tienen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) más bajas. Estas tecnologías adquirirán aún más importancia en razón de las nuevas restricciones para el carbono que impone el próximo acuerdo mundial sobre el cambio climático que se firmará en 2015. A partir principalmente de la base de datos Ecoinvent y las conclusiones del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos, el valor medio de las emisiones de GEI de un reactor de agua ligera se estima en 14,9 g de equivalente en CO₂ por kWh, comprendidas las emisiones durante el ciclo de vida, desde la extracción del uranio hasta la disposición final de los desechos.

Las emisiones de GEI de la energía hidroelectrica de los embalses alpinos y no alpinos, así como la de los sistemas de agua fluyente, durante el ciclo de vida son comparables a las de la energía nucleoelectrica. Las emisiones de la energía eólica dependen del tamaño (clase) de las turbinas eólicas; las unidades más pequeñas (1-3 MW) en realidad producen emisiones más bajas por capacidad que las unidades más grandes (>3 MW), cuya construcción requiere un mayor uso de energía y materiales. Las unidades pequeñas en tierra firme y mar adentro tienen emisiones comparables a la energía nucleoelectrica, mientras que las unidades más grandes pueden tener valores diez veces superiores.

De acuerdo con estos valores, las emisiones de la energía fósil son aproximadamente diez veces mayores que las de la energía nucleoelectrica. Por ejemplo, el valor de las emisiones del carbón antracítico se estima en alrededor de 1 200 g de equivalente en CO₂ por kWh, y el valor de las emisiones del gas natural, de aproximadamente 650 g de equivalente en CO₂ por kWh, es casi la mitad que el del carbón. Las emisiones de GEI de la energía fósil posiblemente puedan reducirse mediante la captura y el secuestro de carbono, que daría como resultado emisiones de alrededor de 200 g de equivalente en CO₂ por kWh para el carbón y de 150 g de equivalente en CO₂ por kWh para el gas natural.

Las emisiones de GEI de la energía nucleoelectrica ya son intrínsecamente bajas, pero en el futuro lo serán aún más por la mayor eficiencia energética de la producción de uranio enriquecido, la mejora de los combustibles nucleares y el mayor uso que se podrá hacer de los reactores, así como porque las centrales nucleares tendrán una vida útil más larga y ello reducirá la necesidad de construir nuevas instalaciones.

A.3. Ciclo del combustible

A.3.1. Recursos y producción de uranio

22. Los precios al contado del uranio siguieron deprimidos en 2013 y alcanzaron el mínimo en siete años, bajando de unos 115 dólares/kg U a principios de año a aproximadamente 90 dólares/kg U a finales de año. El impacto también se percibió en el precio a largo plazo notificado, que fue de alrededor de 150 dólares/kg U a principios de año y bajó a unos 130 dólares/kg U a finales de año. La reducción de los precios limitó considerablemente la capacidad de las empresas de recaudar fondos para estudios de prospección y viabilidad, lo cual influirá en la producción futura. Posiblemente se retrasen muchos nuevos proyectos que estaban anunciados. En el informe *Uranio 2011: Recursos, Producción y Demanda*, conocido como el “Libro Rojo” y publicado conjuntamente por el OIEA y la Agencia de Energía Nuclear (AEN) de la OCDE en 2012, se estimaba que la cantidad total identificada de recursos de uranio convencionales, recuperables a un coste inferior a 260 dólares/kg U, era de 7,1 millones de toneladas de uranio (Mt U).

³ Se puede consultar información adicional sobre energía nucleoelectrica y cambio climático en <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/Documents/>.

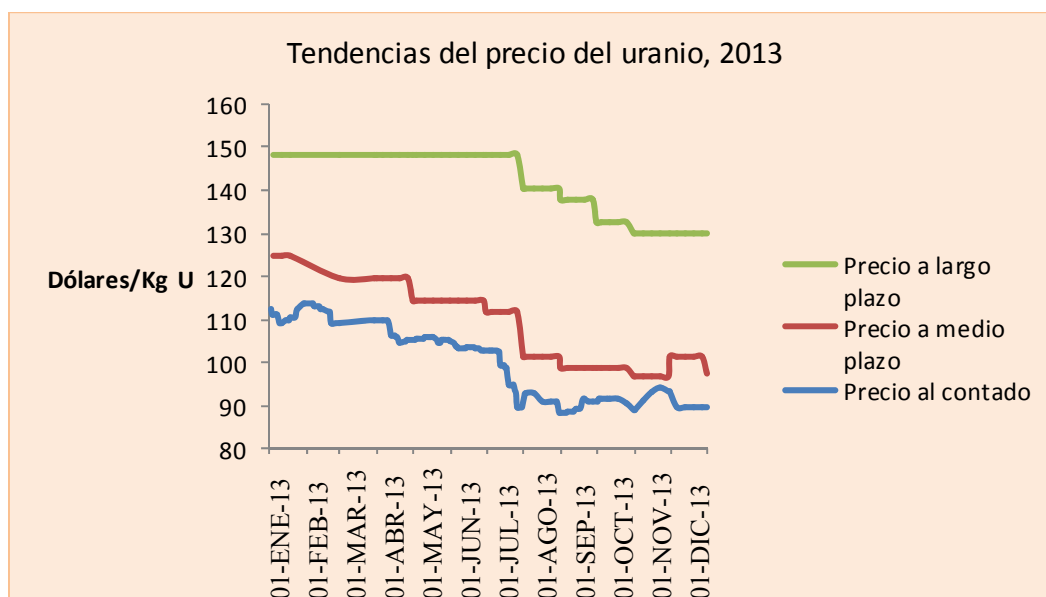


Fig. A-8. Tendencias del precio del uranio, basadas en los indicadores del mercado del uranio de TradeTech.

23. En 2013 se notificaron recursos adicionales en muchos países, como por ejemplo en Australia, Botswana, el Canadá, China, el Reino de Dinamarca (Groenlandia), Eslovaquia, la Federación de Rusia, la India, Jordania, Mongolia, Namibia, la República Centroafricana, la República Checa y Sudáfrica.

24. Continuaron los preparativos para producir uranio como producto secundario de la mina de níquel de Talvivaara al este de Finlandia. Los recursos de uranio de esta mina son de 22 000 t U con una producción prevista de 350 t U anuales. Según las previsiones, la extracción de uranio comenzará en 2014.

25. Se han hecho investigaciones sobre el agua de mar como fuente no convencional de uranio. Hay unos 4 500 millones de toneladas de uranio, que representan un enorme recurso energético, disueltos en los océanos del mundo a concentraciones muy bajas de alrededor de 3,3 partes por mil millones, en comparación con las concentraciones de rocas terrestres de entre 1 000 y 5 000 partes por mil millones. Se siguieron haciendo algunas investigaciones en relación con esta fuente potencial.

26. La WNA estima que la producción de uranio ascendió a 53 493 t U en 2011, 58 394 t U en 2012 y 54 039 t U en 2013.

27. La lixiviación in situ superó a la minería subterránea como método principal de producción en 2009 y se espera que la proporción de la producción por lixiviación in situ siga aumentando a medio plazo. En 2012 se hicieron ampliaciones en varias minas de lixiviación in situ en Kazajstán, con lo que la producción del país se ha incrementado en alrededor de 2 250 t U anuales. Según informa la WNA, la extracción por lixiviación in situ representó aproximadamente el 45 % de la producción mundial de 2012.

28. En Namibia, en 2012 terminó la etapa 3 de ampliación de la mina Langer Heinrich de Paladin Energy para aumentar la producción anual a 2 000 t U. Actualmente hay en estudio una etapa 4 de ampliación para incrementar aún más la producción anual hasta 3 900 t U. Dadas las actuales condiciones del mercado, AREVA ha mantenido en suspenso su explotación de la mina de Trekkopje en Namibia. Se ha iniciado la construcción en la mina de Husab en Namibia (figura A-9); su entrada en funcionamiento está prevista para 2015 y posiblemente en 2017 alcanzará su plena capacidad de 5 770 t U posiblemente en 2017. En 2015 está previsto que empiece a funcionar una nueva mina en Níger, Imouraren, con una capacidad de 5 000 t U.



Fig. A-9. Emplazamiento de la mina de uranio de Husab (Namibia). (Fotografía: Grupo General de Energía Nucleoeléctrica de China).

29. Hay estudios de viabilidad en curso para el proyecto de Letlhakane en Botswana. La licencia para la primera mina de uranio de la República Unida de Tanzania se anunció en abril de 2013, pero se prevé un retraso del proyecto debido a la depresión de los mercados de uranio.

30. En Australia meridional, Quasar Resources anunció que en 2014 comenzará a realizar operaciones de extracción por lixiviación in situ en los yacimientos oriental y occidental de Four Mile. En Australia occidental, la mina de uranio de Wiluna de Toro Energy recibió del gobierno federal la aprobación ambiental final para los yacimientos originales, y la empresa adquirió de Mega Uranium el proyecto de uranio del cercano lago Maitland.

31. En los Estados Unidos de América, los proyectos de lixiviación in situ de North Butte y Lost Creek, en Wyoming, iniciaron la producción en mayo y agosto de 2013 respectivamente.

32. En Turquía se han ultimado los estudios de previabilidad para el proyecto de lixiviación in situ de Temrezli y se han concedido las licencias necesarias para la explotación. Se prevé que la producción comience en 2016 con una cantidad anual de 350 t U.

33. En 2013, el parlamento de Groenlandia (Reino de Dinamarca) votó a favor de levantar la prohibición que desde hacía mucho tiempo regía sobre la extracción de materiales radiactivos, entre ellos el uranio. Esta decisión podría permitir la continuación del proyecto de Kvanefjeld, que actualmente está supeditado a un estudio de viabilidad para evaluar una operación de extracción para la producción de uranio, elementos de tierra rara y zinc.

34. Existen planes en relación con un programa de pruebas metalúrgicas preliminares para el proyecto de Närke, en la zona central de Suecia, donde las lutitas aluminosas posiblemente alberguen más de 257 000 t U. En España se concedió una licencia ambiental para el yacimiento de Retortillo del proyecto de uranio Salamanca-1, y se ha iniciado un proceso formal para la concesión de una licencia y permiso de explotación. Rumania ha anunciado planes para abrir una nueva mina de uranio en Neamt a fin de compensar el agotamiento de los recursos de la actual mina de Suceava.

35. En 2013 Uzbekistán finalizó la construcción de tres campos mineros de recuperación in situ de uranio en la zona central del Kyzylkum. El Ministerio de Tierras y Recursos Naturales de China seleccionó seis minas de uranio como “minas nacionales verdes”. Las minas verdes son empresas mineras respetuosas con el medio ambiente que en sus operaciones diarias prestan atención al ahorro de energía, la reducción de emisiones y la bonificación de tierras. La República Islámica del Irán anunció el comienzo de las operaciones en la mina de uranio de Saghand y la fábrica conexa cerca de Ardakan.

36. La WNA estima que la producción de uranio en 2013 cubrió solamente alrededor del 83 % de las 64 978 t U de consumo estimado de uranio de los reactores. El resto se cubrió mediante cinco fuentes secundarias: las reservas militares de uranio natural, las reservas de uranio enriquecido, el

uranio reprocesado a partir de combustible gastado, combustible de MOX con uranio 235 parcialmente sustituido por plutonio procedente de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de colas de uranio empobrecido. Al ritmo de consumo estimado de 2012, la vida útil de las 5,3 toneladas métricas de uranio, que son los recursos totales estimados económicamente viables a los precios actuales del mercado, sería de 78 años.

37. Los recursos de uranio no convencionales y el torio amplían aún más la base de recursos. Las estimaciones actuales cifran en alrededor de ocho millones de toneladas el uranio potencialmente recuperable en forma de productos secundarios de poca importancia. En marzo de 2013, Uranium Equities, que explota una planta de demostración en Florida (Estados Unidos de América), anunció que un estudio había mostrado que su Proceso PhosEnergy para la extracción de uranio a partir de fosfatos es viable y eficaz en función del costo. Se presentó un informe de evaluación del impacto ambiental para la mina de Itataia en Santa Quitéria (Brasil), para dos plantas de producción de fosfatos y concentrado de uranio.

38. Los recursos mundiales de torio se estiman en unos seis a siete millones de toneladas. Aunque el torio se ha utilizado como combustible a escala de demostración, aún se requieren trabajos exhaustivos para poder considerarlo como tal. Hay algunos proyectos relacionados con elementos de tierra rara que podrían producir torio como producto secundario y residuos con contenido de torio, que previsiblemente entrarán en producción a corto plazo en Australia (Nolans Bore), el Reino de Dinamarca (Kvanefjeld, en Groenlandia) y Sudáfrica (Steenkampskraal). En abril de 2013, Thor Energy inició en Halden (Noruega) un programa de pruebas de combustible de mezcla de óxidos (MOX) de torio.

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible

39. Seis países (el Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el 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 Brasil, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán hay en funcionamiento instalaciones de conversión en pequeña escala. El proceso en seco de volatilización de fluoruros se utiliza 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 76 000 t U en forma de UF_6 anuales. Sin embargo, se esperan cambios importantes con una nueva planta que hay en construcción en Francia (Comurhex II de AREVA) y otra que se está renovando en los Estados Unidos de América (la instalación Metropolis Works de Honeywell).

40. Comurhex II, con una capacidad de 15 000 t U que podría ampliarse a 21 000 t U, sustituirá a las plantas existentes ubicadas en los emplazamientos de Malvési y Tricastin. La producción en Comurhex II se iniciará progresivamente cuando se haya finalizado la producción en Comurhex I.

41. La instalación Metropolis Works de Honeywell (figura A-10) reanudó la producción en junio de 2013 después de que se actualizaran el equipo y los procesos para aumentar la eficiencia y reducir el tiempo muerto de la planta.



Fig. A-10. Nuevo vaporizador de fluoruro de hidrógeno, instalación Metropolis Works de Honeywell (Illinois, Estados Unidos de América). (Fotografía: Coverdyn).

42. En 2011, la Corporación Estatal de Energía Atómica ROSATOM de la Federación de Rusia decidió iniciar un proyecto para concentrar todas las instalaciones de conversión en un emplazamiento, el del Grupo Siberiano de Empresas Químicas en Seversk. Se ha previsto cerrar en abril de 2014 el emplazamiento de conversión situado en Angarsk.

43. La demanda total actual de servicios de conversión (suponiendo una concentración de las colas de enriquecimiento⁴ del 0,25 % de uranio 235) es del orden de 60 000 a 64 000 toneladas anuales.

44. A comienzos de 2018 está previsto iniciar en Kazajstán la construcción de una nueva refinería de trióxido de uranio (UO_3), una empresa conjunta entre Kazatomprom y la canadiense Cameco. Situada en la Planta Metalúrgica de Ulba, en Ust-Kamenogorsk, se prevé que tendrá una capacidad de producción de 6 000 t UO_3 por año.

45. 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 49 millones de UTS anuales. Cinco compañías prestan servicios de enriquecimiento comerciales: la Corporación Nuclear Nacional de China, (CNNC), AREVA (Francia), ROSATOM (Federación de Rusia), USEC y URENCO (estas ambas de los Estados Unidos de América).

46. URENCO tiene plantas de centrifugación en funcionamiento en Alemania, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y el Reino Unido. La capacidad de URENCO en la UE alcanzó a finales de 2012 un total de 14,7 millones de UTS al año. La instalación de URENCO en los EE.UU. (figura A-11) en la actualidad tiene licencia para una capacidad inicial de tres millones de UTS al año, y a principios de 2013 se decidió una inversión para ampliarla a 5,7 millones de UTS, con el objetivo de alcanzar esta capacidad en 2022. URENCO ha solicitado a la Comisión Reguladora Nuclear una modificación de la licencia que autorice a la compañía a aumentar su capacidad de producción en los EE.UU. a diez millones de UTS anuales.



Fig. A-11. Instalación de enriquecimiento de URENCO, Eunice, Nuevo México (Estados Unidos de América). (Fotografía: URENCO).

47. La planta de USEC de enriquecimiento por difusión gaseosa de Paducah, que es la planta de enriquecimiento más antigua del mundo que hay en funcionamiento, llegó al fin de sus operaciones comerciales en 2013 después de más de 60 años de explotación. USEC prevé continuar las operaciones en el emplazamiento en 2014 a fin de hacer la gestión del inventario, servir los pedidos de

⁴ La concentración de las colas, o la concentración de uranio 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.

los clientes y cumplir los requisitos del arrendamiento con el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos relativos al volumen de operaciones.

48. En los Estados Unidos de América hay dos nuevas instalaciones de enriquecimiento por centrifugación en fase de diseño y planificación: la instalación de enriquecimiento de Eagle Rock, de AREVA, y la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América, de USEC. La instalación de enriquecimiento de Eagle Rock actualmente está en suspenso y AREVA está buscando socios financieros y modelos financieros alternativos para optimizar los gastos de capital. El calendario de USEC para terminar de construir la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América depende de la obtención de financiación a través del programa de garantía de préstamos del DOE.

49. La instalación de Global Laser Enrichment en Wilmington, Carolina del Norte (Estados Unidos de América), concluyó en junio de 2013 la primera fase del programa de circuito de ensayo para demostrar la aplicación de la tecnología láser para el enriquecimiento de uranio. Después de una segunda fase de estudios más detallados, se prevé que la primera instalación comercial tenga capacidad para producir seis millones de UTS por año. Según Silex, el DOE ha iniciado conversaciones con Global Laser Enrichment sobre la construcción de otra planta de enriquecimiento por láser en el emplazamiento de Paducah para enriquecer sus reservas (alrededor de 100 000 toneladas) de colas de uranio empobrecido con alta concentración.

50. En Francia, AREVA presentó oficialmente su instalación de enriquecimiento de uranio Georges Besse II Norte en marzo de 2013, que se suma a la planta Sur inaugurada en diciembre de 2010.

51. En 2013, la planta electroquímica de TVEL en Zelenogorsk (figura A-12), una de las cuatro plantas de enriquecimiento de uranio que hay en funcionamiento en la Federación de Rusia, recibió una renovación de la licencia de explotación hasta 2023. En 2012, TVEL y Kazatomprom acordaron su participación en el aumento del capital social de la instalación de enriquecimiento de Ural Electrochemical Integrated Plant, que según se prevé tendrá una capacidad de cinco millones de UTS anuales.



Fig. A-12. Planta electroquímica en Zelenogorsk (Federación de Rusia). (Fotografía: TVEL).

52. También hay instalaciones de enriquecimiento en pequeña escala en la Argentina, el Brasil, la India, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán. La Argentina está reconstruyendo su capacidad de difusión gaseosa en Pilcaniyeu. Actualmente, los servicios de enriquecimiento se importan de los Estados Unidos de América.

53. La capacidad total mundial de reconversión⁵ en 2013 se ha mantenido en unas 60 000 t UF₆ anuales.

⁵ Para manufacturar combustible de uranio enriquecido, el UF₆ enriquecido ha de reconvertirse en polvo de UO₂. Es la primera etapa de la fabricación de combustible enriquecido. Se denomina reconversión o desconversión.

54. La demanda anual de servicios de fabricación de combustible para reactores de agua ligera (LWR) siguió siendo de unas 7 000 toneladas de uranio enriquecido en conjuntos combustibles, pero se prevé que aumente a unas 8 000 t U anuales para el año 2015. En el caso de los reactores de agua pesada a presión (PHWR), las necesidades ascendieron a 3 000 t U anuales. Ahora hay varios suministradores compitiendo por la mayoría de tipos de combustibles. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 500 t U anuales (uranio enriquecido en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para LWR y en unas 4 000 t U anuales (uranio natural en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para PHWR. En el caso del combustible de uranio natural para PHWR, el uranio se purifica y se convierte en dióxido de uranio (UO₂) en la Argentina, el Canadá, China, la India y Rumania.

55. En China, la capacidad de producción de la planta de combustible de la CNNC en Yibin en 2012 fue de aproximadamente 600 t U anuales. En cuanto a la planta de la CNNC en Baotou, Mongolia Interior, que fabrica conjuntos combustibles para los PHWR CANDU de Qinshan (200 t U anuales), su capacidad de combustible se está ampliando a 400 t U anuales. Se está estableciendo una nueva planta en Baotou con objeto de fabricar combustible para los reactores AP1000 de China.

56. Se prevé que en 2014 estará terminada una instalación de fabricación de combustible proyectada en Kazajistán como empresa conjunta de AREVA y Kazatomprom, con una capacidad prevista de 1 200 t U anuales.

57. Cerca de Smoline, en Ucrania, ha proseguido la construcción de una planta de fabricación de combustible para reactores WWR-1000, con una capacidad prevista de 400 t U anuales.

58. En los últimos años, TVEL ha desarrollado un conjunto combustible para reactores de agua a presión y, para probar su funcionamiento, en 2014 se cargarán cuatro conjuntos piloto en la planta de PWR Ringhals-3, en Suecia.

59. Las operaciones de reciclado proporcionan una fuente secundaria de suministro de combustibles nucleares mediante el uso de uranio reprocesado y combustible de MOX. Elektrostal (Federación de Rusia) produce actualmente unas 100 t anuales de uranio reprocesado para AREVA. Una línea de producción de la planta de AREVA en Romans (Francia) fabrica anualmente combustible para reactores de agua ligera de Francia a partir de alrededor de 80 toneladas de metal pesado de uranio reprocesado. La capacidad mundial de fabricación de combustible de MOX es actualmente de unas 250 toneladas de metal pesado; las principales instalaciones se encuentran en Francia, la India y el Reino Unido, con algunas más pequeñas en el Japón y la Federación de Rusia.

60. La India y la Federación de Rusia fabrican combustible de MOX para su utilización en reactores rápidos. En la Federación de Rusia hay una instalación de fabricación de combustible de MOX para el reactor rápido BN-800 en construcción en Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Federación de Rusia también tiene instalaciones piloto en Dimitrovgrad, en el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos, y en Ozersk, en la planta Mayak.

61. En 2013, en todo el mundo alrededor de 30 LWR utilizaron combustible de MOX.

62. En octubre de 2013, la instalación de fabricación de combustible de Melox, de AREVA, comenzó a producir combustible de MOX para la central nuclear de Borssele, en los Países Bajos. En los últimos 30 años, en la planta de AREVA de La Hague se han reprocesado 375 toneladas de combustible gastado de Borssele.

Garantía de suministro

63. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA en Kazajistán. Durante 2012 y 2013, la Secretaría del Organismo prosiguió la

labor relativa a las disposiciones financieras, jurídicas y técnicas y las evaluaciones de posibles emplazamientos donde establecer el banco. Los Estados Miembros, la UE y la Nuclear Threat Initiative (NTI) han hecho promesas de contribución para la creación del banco de UPE por valor de más de 150 millones de dólares. A finales de 2013 se habían pagado íntegramente las cantidades prometidas por Kuwait (10 millones de dólares), Noruega (5 millones de dólares), la NTI (50 millones de dólares), los Emiratos Árabes Unidos (10 millones de dólares) y los Estados Unidos de América (aproximadamente 50 millones de dólares); la UE había pagado 20 de los 25 millones de euros prometidos⁶.

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible nuclear

64. En relación con el combustible nuclear gastado se utilizan dos estrategias de gestión distintas. El combustible se reprocesa a fin de extraer material utilizable (uranio y plutonio) para combustible nuevo, o sencillamente se considera un desecho y se almacena en espera de su disposición final. Actualmente, países como China, la Federación de Rusia, Francia y la India reprocesan el combustible gastado, mientras que otros, como el Canadá, Finlandia y Suecia, han optado por la disposición final directa en una comunidad receptora voluntaria. La mayoría de países no han decidido aún qué estrategia adoptar, por lo que están almacenando el combustible gastado y, al mismo tiempo, se mantienen al corriente de la evolución de cada alternativa.

65. La Directiva del Consejo 2011/70/Euratom de la Unión Europea (UE) obliga legalmente a los Estados Miembros de la UE a establecer y mantener una política sobre la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos. En la esfera de la gestión del combustible gastado también se ha empezado a prestar atención a la demostración del comportamiento del combustible gastado en sistemas de almacenamiento en seco, ya que sin duda pasarán varios decenios antes de que existan repositorios de desechos de actividad alta en muchos de los principales países que utilizan la energía nucleoelectrica.

66. La construcción de una instalación de almacenamiento en seco para combustible gastado de la central nuclear de Sizewell B de EDF Energy (Reino Unido) comenzó en enero de 2013. Está previsto que la instalación esté en funcionamiento para 2015.

67. Tras su suspensión en 2012 de todas las decisiones finales sobre las solicitudes relacionadas con nuevos reactores o con la renovación de la licencia de reactores en espera de una actualización de su “decisión sobre la confianza en relación con los desechos” y la “norma sobre almacenamiento temporal”, la NRC de los Estados Unidos publicó en marzo de 2013 el documento titulado *Waste Confidence Generic Environmental Impact Statement Scoping Process: Summary Report*. El borrador de la declaración general sobre el impacto ambiental y la norma propuesta sobre el almacenamiento temporal se pusieron a disposición del público para que formulara observaciones en 2013. Mientras que la instancia encargada de la confianza en relación con los desechos prepara la actualización de la decisión sobre la confianza en relación con los desechos y la norma sobre el almacenamiento temporal, la NRC sigue examinando al mismo tiempo las solicitudes relativas a reactores, las solicitudes de renovación de las licencias y las solicitudes de renovación de licencia de instalaciones concretas de almacenamiento de combustible gastado independientes.

68. En 2013 se descargaron como combustible gastado de todas las centrales nucleares unas 10 000 t HM. La cantidad total acumulada de combustible gastado que se había descargado en todo el mundo hasta diciembre de 2013 era de unas 370 500 t HM, de las cuales unas 253 700 t HM se encuentran almacenadas en instalaciones de almacenamiento situadas en el emplazamiento del reactor o fuera de éste. Menos de un tercio de la cantidad acumulada de combustible gastado descargado en

⁶ En el Examen de la tecnología nuclear — 2012 se describen otros mecanismos de garantía de suministro actualmente en vigor.

todo el mundo, unas 112 800 t HM, ya ha sido reprocesado. En 2013, la capacidad mundial de reprocesamiento comercial, concentrada en cuatro países (Federación de Rusia, Francia, India y Reino Unido), fue de unas 4 800 t HM anuales.

69. En la India prosiguieron en 2013 los trabajos de construcción de la instalación del ciclo del combustible para reactores rápidos, de Kalpakkam. La instalación propuesta está concebida para fabricar combustible destinado al próximo prototipo de reactor reproductor rápido y las subsiguientes dos unidades adicionales.

70. La planta de reprocesamiento comercial de 800 t HM anuales de Rokkasho, de la Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL), en la que se había dejado de trabajar a consecuencia del terremoto y el tsunami del 11 de marzo de 2011, estaba lista para su puesta en servicio a finales de 2013. Las pruebas de producción de desechos vitrificados en uno de los dos hornos de fundición han culminado con éxito. Una vez que esté en funcionamiento, tras haber recibido las autorizaciones reglamentarias, la capacidad máxima de reprocesamiento de la planta será de 800 toneladas al año. (Figura A-13).



Fig. A-13. Planta de reprocesamiento de Rokkasho (Japón). (Fotografía: JNFL).

71. China ha anunciado una propuesta para reprocesar el combustible gastado de reactores en una nueva planta, con capacidad para tratar 800 toneladas de combustible gastado al año, que se construirá en cooperación con AREVA.

72. En octubre de 2013, el Gobierno del Reino Unido anunció un acuerdo con EDF en el que se da el visto bueno a la construcción de la primera central nuclear en el Reino Unido en los últimos 20 años. En el libro blanco de 2008 del Gobierno del Reino Unido se indicaba que en la nueva construcción se tenía que partir de la base de que el combustible gastado no se reprocesaría. La estrategia actual relativa a la gestión del combustible gastado en Hinkley Point C será el almacenamiento en el reactor por un plazo de hasta 10 años seguido del almacenamiento provisional en una instalación independiente de almacenamiento de combustible gastado hasta que se disponga de una instalación de disposición final geológica. La base de diseño de esta instalación de almacenamiento es el almacenamiento en húmedo con intercambiadores de calor sumergidos en la piscina que posibiliten la retirada pasiva del calor. Este tipo de tecnología también está siendo evaluada por el Brasil.

73. Entre marzo y mayo de 2013, los nueve cofres de almacenamiento en seco que se encontraban en la zona de vigilancia de cofres junto al mar en la central nuclear de Fukushima Daiichi fueron trasladados a la piscina común de almacenamiento de combustible gastado para su inspección y posteriormente fueron enviados a la nueva zona vigilada de almacenamiento temporal de cofres. Las inspecciones mostraron que ni la contención del cofre ni la integridad del combustible se habían visto comprometidas. En noviembre de 2013 se iniciaron en el emplazamiento nuevas operaciones de recuperación del combustible, con retiradas rutinarias de la piscina de combustible gastado de la unidad 4, lo que señaló un hito importante hacia la reducción de riesgos y la clausura.

74. En octubre de 2013, la Compañía de Almacenamiento de Combustible Reciclable del Japón (que depende de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio y la Compañía de Energía Atómica del Japón) finalizó la construcción del edificio de almacenamiento provisional de combustible gastado en la ciudad de Mutsu, prefectura de Aomori. De acuerdo con su licencia vigente, puede almacenar 3 000 t U de combustible gastado y está previsto que alcance una capacidad de 5 000 t U. La Autoridad Reguladora Nuclear estuvo presente en el ensayo oficial final. No obstante, el logro de otros progresos depende de que se obtenga la certificación basada en los nuevos requisitos de seguridad de la Autoridad Reguladora Nuclear.

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

75. Los desechos radiactivos se derivan del uso de las tecnologías nucleares en la producción de energía, las actividades de investigación y las aplicaciones médicas e industriales. Además del combustible gastado declarado como desecho o las corrientes de desechos generadas como subproducto del reprocesamiento del combustible gastado, se generan desechos radiactivos durante la explotación de instalaciones nucleares, su clausura y la restauración conexas de los emplazamientos, comprendidos los antiguos emplazamientos y los que tienen actualmente usos militares, así como los emplazamientos después de un accidente. La gestión segura de los desechos radiactivos requiere una gestión adecuada de las corrientes de desechos, su tratamiento y acondicionamiento, así como la existencia de una capacidad de almacenamiento adecuada, un sistema de transporte entre las instalaciones y, en última instancia, una opción de disposición final.

Estimaciones del inventario mundial de desechos radiactivos

76. El inventario mundial de desechos radiactivos declarados como desechos almacenados en 2013 fue de unos 68 millones de m³ (cuadro A-2). La cantidad acumulada de desechos radiactivos sometidos a disposición final hasta 2012 fue de unos 76 millones de m³, que incluyen la inyección en pozos profundos de unos 29 millones de m³ de desechos líquidos, y la disposición final de cerca de 4 000 m³ de desechos sólidos de actividad alta (HLW), provenientes principalmente de Chernóbil. La acumulación anual de HLW procesados es bastante constante, con una tasa media de acumulación de unos 850 m³ anuales en todo el mundo (excluido el combustible gastado).

77. En diciembre de 2013 había en todo el mundo 467 instalaciones de almacenamiento y 154 instalaciones de disposición final de desechos en funcionamiento⁷ para la gestión de esos inventarios de desechos.

⁷ Según la información facilitada por los Estados Miembros a la Base de datos sobre gestión de desechos en Internet (NEWMDB) del Organismo, accesible en línea en la dirección: <http://newmdb.iaea.org/>.

Cuadro A-2. Estimación del inventario mundial de desechos radiactivos correspondiente a 2013⁸

Clase de desechos	Almacenamiento ⁹ [metros cúbicos]	Disposición final acumulada [metros cúbicos]
<i>Desechos de actividad muy baja (VLLW)</i>	163 000¹⁰	193 000
<i>Desechos de actividad baja (LLW)</i>	56 663 000¹¹	64 992 000¹²
<i>Desechos de actividad intermedia (ILW)</i>	8 734 000	10 588 000
<i>Desechos de actividad alta (HLW)</i>	2 744 000	72 000¹³

Fuente: Base de datos sobre gestión de desechos en Internet (2013), informes nacionales oficiales y datos públicos disponibles.

Clausura

78. A diciembre de 2013, 149 reactores de potencia de todo el mundo habían sido puestos en régimen de parada permanente. En total, 16 reactores de potencia han sido desmantelados íntegramente, otros 52 reactores están siendo desmantelados, 59 se encuentran en modalidad de confinamiento seguro o están a la espera del inicio del desmantelamiento final, tres están sepultados y en el caso de 17 no se ha especificado aún ninguna estrategia de clausura. Aproximadamente el 40 % de los 434 reactores nucleares en funcionamiento del mundo tienen más de 30 años y alrededor del 7 % tienen más de 40 años. Si bien es posible que algunos sigan funcionando hasta los 60 años, muchos serán retirados del servicio en los próximos 10 a 20 años. Salvo en casos especiales, por ejemplo, los

⁸ Las cifras del cuadro A-2 son estimaciones y no un recuento exacto de las cantidades de desechos radiactivos que actualmente se gestionan a escala mundial. Además, hay diferencias inherentes en las estimaciones de material almacenado de un año a otro debido a los siguientes factores: a) cambios de masa y volumen durante el proceso de gestión de los desechos; b) cambios en la notificación y cambios o correcciones efectuados por los Estados Miembros en sus propios datos; y c) incorporación de nuevos Estados Miembros a la base de datos.

⁹ Normalmente los desechos se someten a tratamiento y acondicionamiento y pasan por varias fases de manipulación durante su almacenamiento y antes de su 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.

¹⁰ La estimación de los VLLW es mucho más baja que la de los LLW porque muchos Estados Miembros con inventarios significativos de desechos no definen los VLLW como clase de desechos. Ahora bien, muchos de estos Estados Miembros están reconsiderando actualmente sus definiciones de las clases de desechos a fin de ajustarlas más a las recomendadas en la publicación titulada *Classification of Radioactive Waste* (Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSG-1, 2009), por lo que es probable que esta estimación sea más alta en el futuro, con la correspondiente disminución en la categoría de los LLW.

¹¹ La estimación de los LLW almacenados no incluye alrededor de 4×10^8 m³ de LLW líquidos que, según se ha notificado, se encuentran en depósitos especiales no aislados del entorno circundante, ya que este caso no se ajusta a la definición del Organismo de "almacenamiento" contenida en el *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA* (2007). Por esta razón, la inclusión de esos desechos en esta estimación todavía no es segura.

¹² El cambio significativo en la estimación de la disposición final acumulada de los LLW y los ILW en comparación con el informe anterior se debe a la inclusión de estimaciones de la Federación de Rusia.

¹³ Este volumen de desechos de actividad alta es una combinación de los desechos líquidos sometidos a disposición final y notificados por la Federación de Rusia, y los cerca de 4 000 m³ de desechos radiactivos sólidos notificados por Ucrania y considerados provisionalmente como sometidos a disposición final hasta que se encuentre un diseño/lugar o solución más permanente. La disposición final de los HLW de Ucrania fue resultado de las actividades de descontaminación de emergencia llevadas a cabo tras el accidente en la unidad 4 de la central nuclear de Chernóbil.

reactores moderados por grafito, para los que no existen aún vías de disposición final de desechos, la estrategia de clausura generalmente preferida en la mayoría de Estados Miembros es el “desmantelamiento inmediato”, es decir, el inventario radiológico se retira del emplazamiento y queda exento de control reglamentario en un plazo de 15 a 25 años tras la parada.

79. De los 480 reactores de investigación y conjuntos críticos que están en régimen de parada permanente, el 70 % ya han sido totalmente clausurados. Varios cientos de otras instalaciones nucleares, como instalaciones de gestión de desechos radiactivos o del ciclo del combustible, han sido clausuradas o están siendo desmanteladas.

80. Los Estados Miembros con grandes programas nucleoelectrónicos, es decir, los que iniciaron la producción de energía nuclear en los decenios de 1950 y 1960, han avanzado considerablemente en la tarea de hacer frente al legado de sus primeras actividades. Esos países han creado tecnologías y conocimientos especializados para ejecutar programas de clausura y de restauración ambiental. Han adquirido estos conocimientos especializados órganos reguladores, entidades explotadoras y una serie de organizaciones técnicas que prestan servicios de cadena de suministro- a los titulares de las instalaciones y los emplazamientos que serán objeto de clausura o restauración. No obstante, aún se necesitarán varios decenios de esfuerzos para restaurar plenamente importantes emplazamientos de producción de uranio y emplazamientos utilizados en las primeras actividades de investigación. A continuación se indican programas que lograron avances considerables en la clausura activa de centrales nucleares en 2013:

- Francia – descontaminación y retirada de generadores de vapor de la central nuclear de Chooz A y su disposición final en el emplazamiento de disposición final de desechos de actividad muy baja en Morvilliers;
- España – finalización de la segmentación y retirada de los dispositivos interiores del reactor de la central nuclear José Cabrera;
- Reino Unido – descontaminación de las piscinas de combustible gastado en la central nuclear de Bradwell como parte de los preparativos para la aplicación del confinamiento seguro en 2015;
- Estados Unidos de América – retirada en curso de los desechos radiactivos de actividad baja de la central nuclear de Zion como parte de la decisión de proceder al desmantelamiento inmediato en lugar de la estrategia anterior de desmantelamiento diferido.

81. En los Estados Miembros sin programas de energía nuclear importantes los avances suelen ser mucho menores. Eso se debe, entre otras cosas, a la falta de marcos de carácter jurídico, normativo y regulador adecuados y de planes de financiación conexos, la falta de tecnología y de conocimientos especializados apropiados, y la existencia de mecanismos poco adecuados para dar participación a los interesados afectados.

82. Las autoridades japonesas siguieron aplicando la Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las unidades 1-4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi, TEPCO (publicada en 2011, actualizada en junio de 2012). La fase 1 de la hoja de ruta (diciembre de 2011 a diciembre de 2013) se centró en las actividades de descontaminación y estabilización como parte de los preparativos para la retirada del combustible de las piscinas de combustible gastado (en la fase 2). La retirada del combustible de la unidad 4 comenzó en noviembre de 2013, un mes antes de lo inicialmente previsto. Se prevé retirar el combustible de la unidad 3 en 2015, y de las unidades 1 y 2 en 2017. También se están elaborando planes para la retirada en la fase 3 (después de diciembre de 2021) de los residuos del combustible de los edificios del reactor. En función de la sismorresistencia de los edificios dañados, quizás sea necesario construir nuevas superestructuras sobre los edificios para que puedan soportar las máquinas de manejo de combustible. Estas cuestiones se abordarán durante 2014 y se propondrán soluciones adecuadas. Se han seguido realizando actividades de investigación y desarrollo importantes para posibilitar la creación de instrumentos de control remoto que detecten los daños en las vasijas de contención primaria.

Restauración

83. La restauración ambiental incluye cualquier medida que se pueda poner en práctica para reducir la exposición a la radiación ocasionada por la contaminación de superficies terrestres mediante la aplicación de medidas a la propia contaminación (la fuente) o a las vías de exposición para los seres humanos. Hay muchos emplazamientos en todo el mundo en los que se están aplicando medidas reparadoras o en las que aún deben aplicarse. Las actividades de restauración suelen requerir una gran cantidad de recursos y una planificación adecuada, buena gestión del proyecto y profesionales cualificados, así como un marco regulador adecuado. Las repercusiones de estos elementos específicos en la ejecución tanto de los proyectos de restauración como de clausura están siendo analizados por el Organismo en el marco del Proyecto sobre limitaciones en la ejecución de programas de clausura y restauración ambiental (CIDER). Una vez finalizado este proyecto, se prevé que el Organismo esté en condiciones de dar una imagen clara sobre por qué no se ha avanzado demasiado en esas actividades y de proponer soluciones creativas e innovadoras.

84. Un aspecto importante en 2013 fueron los progresos logrados en las actividades de descontaminación de zonas afectadas por el accidente de Fukushima Daiichi. Las autoridades japonesas han destinado una cantidad importante de recursos a la elaboración de estrategias y planes y a la ejecución de actividades de restauración en amplias zonas contaminadas fuera del emplazamiento. Se realizaron esfuerzos especiales para posibilitar que las personas evacuadas regresaran a sus hogares. También se ha progresado bien en la coordinación de las actividades de restauración con las de reconstrucción y revitalización. En el marco de una misión de seguimiento del Organismo realizada en octubre de 2013 se prestó ayuda al Japón para evaluar los progresos realizados desde la misión anterior, que se llevó a cabo en 2011, se examinaron las estrategias, planes y trabajos de restauración, y se comunicaron las conclusiones a la comunidad internacional.

Desechos radiactivos históricos

85. El Grupo de Contacto de Expertos para iniciativas internacionales sobre el legado nuclear en la Federación de Rusia (CEG) del Organismo contribuye al éxito en la ejecución de programas internacionales en esta esfera. El programa de desmantelamiento de submarinos nucleares fuera de servicio está llegando a su fin. Las unidades de reactor de los submarinos de las que se ha descargado el combustible están siendo precintadas y colocadas en instalaciones de almacenamiento a largo plazo. Actualmente, 65 unidades de reactor de submarinos se encuentran en una instalación de almacenamiento en la zona noroccidental y tres en el extremo oriental de la Federación de Rusia. En los Estados Unidos de América se está llevando a cabo un programa similar, en cuyo marco se han desmantelado 114 submarinos y buques nucleares. Se están construyendo dos centros regionales de acondicionamiento y almacenamiento de desechos radiactivos en la zona noroccidental (figura A-14) y la más oriental de la Federación de Rusia. También se está ejecutando con éxito un programa internacional para recuperar potentes generadores termoeléctricos de radioisótopos que se utilizaron en faros a lo largo de la costa de la Federación de Rusia.



Fig. A-14. Construcción del Centro regional de acondicionamiento de desechos radiactivos y almacenamiento a largo plazo en el noroeste de Rusia. (Fotografía: Energiewerke Nord GmbH).

Tratamiento y acondicionamiento de desechos radiactivos

86. Se generan desechos radiactivos líquidos en la mayoría de las partes del ciclo del combustible nuclear, comprendidas las relacionadas con los reactores de potencia, las instalaciones de tratamiento de desechos y de reprocesamiento, y las actividades de clausura. Las técnicas de tratamiento destinadas a reducir el contenido radiactivo son, entre otras, la precipitación química, la adición de absorbentes de radiactividad muy fragmentados (ambas seguidas de la retirada de sólidos), y el uso de absorbentes de intercambio iónico en forma de columnas. También existe la alternativa de emplear la evaporación o la ósmosis inversa (filtración a nivel atómico). Se siguen mejorando las características de los absorbentes de intercambio iónico especiales mediante la mejora de la selectividad de radionucleidos clave y de las propiedades físicas para su uso en columnas, por ejemplo empleando materiales compuestos. El tratamiento de desechos líquidos ha sido un aspecto importante de la restauración tras el accidente nuclear de Fukushima Daiichi gracias a una instalación de tratamiento suministrada por otros países. Todos los procesos mencionados se combinan para retirar grandes cantidades de los diversos radionucleidos presentes en Fukushima.

87. El acondicionamiento de desechos comprende la inmovilización de los radionucleidos, su colocación en contenedores y el uso de un embalaje suplementario. Los métodos habituales de inmovilización incluyen la solidificación de desechos radiactivos líquidos de actividad baja e intermedia utilizando cemento, asfalto o vidrio, y la vitrificación de desechos radiactivos líquidos de actividad alta en una matriz de vidrio o la inserción en una matriz de metal. Las tendencias actuales siguen mejorando las características de los procesos de inmovilización de desechos de actividad baja e intermedia (LILW). Egipto, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, la India y Serbia han modificado los procesos mediante mezclas con el fin de mejorar las propiedades físicas del cemento y ajustar el potencial de inmovilización para especies o grupos de especies de desechos específicos y contrarrestar el efecto nocivo que pueden tener las especies de desechos inactivos. China, los Estados Unidos de América, Francia, el Reino Unido, Rusia y Suiza han desarrollado nuevos aglomerantes para superar las limitaciones de las propiedades del cemento Portland. Francia presentó un informe sobre la estabilización de sales solubles de zinc mediante el uso de cemento de sulfoaluminato de calcio (CSAC).

88. El Organismo ha evaluado recientemente cuatro tipos de nuevos materiales cementantes: el CSAC, el cemento de aluminato de calcio (CAC), un geopolímero creado a partir de silicato alcalino y metacaolín (SIAL), y el cemento de fosfato de magnesio¹⁴. La experiencia reciente favorable de construcciones con materiales geopoliméricos indica que es posible su aplicación más generalizada en el acondicionamiento de desechos. Los geopolímeros de SIAL han demostrado tener una mayor resistencia a la compresión y una baja lixiviabilidad del cesio 137, y su uso está aprobado en Eslovaquia y la República Checa para la solidificación de lodo y resina radiactivos. Es probable que las investigaciones en Australia, Eslovaquia, la Federación de Rusia y el Reino Unido generen más conocimientos, comprendida información sobre su durabilidad a largo plazo.

Almacenamiento de desechos radiactivos

89. El almacenamiento de desechos posibilita la contención y el aislamiento adecuados de los desechos, y facilita su recuperación para un procesamiento ulterior o su disposición final. En el último decenio se han observado tendencias importantes en el almacenamiento de desechos radiactivos, como los períodos de almacenamiento prolongados y las instalaciones de almacenamiento más seguras. Estas han adquirido más popularidad, especialmente en el caso de los desechos radiactivos de

¹⁴ ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste: Results of a Coordinated Research Project, IAEA TECDOC-1701, OIEA, Viena (2013).

actividad más alta. Una guía sobre buenas prácticas para regular el almacenamiento de desechos radiactivos es el documento de orientación de la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares del Reino Unido titulado *Interim Storage of Higher Activity Waste Packages — Integrated Approach*, publicado en 2012. Los principios utilizados incluyen los ciclos que abarcan toda la vida útil, unas condiciones constantes de embalaje y almacenamiento de desechos para reducir al mínimo la generación de desechos, el principio “más vale prevenir que curar”, la previsión en el diseño, y la gestión del conocimiento efectiva. En las orientaciones se prevé que las instalaciones de almacenamiento tengan una duración de al menos 100 años.

90. En el caso de los nuevos lugares de almacenamiento, la vida de diseño debería ser normalmente de 100 años por lo menos. Además, si se propone utilizar una estructura existente, modificada según corresponda, para el almacenamiento, habrá que demostrar que dicha estructura cumple las normas de construcción modernas, que los materiales seleccionados para realizar trabajos de modificación son adecuados, y que el objetivo de la vida de diseño del almacén resultante es de al menos 100 años.

Disposición final de desechos radiactivos

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

92. Se han adoptado medidas encaminadas a la concesión de licencias para instalaciones de disposición final geológica de HLW y/o combustible gastado en Finlandia, Francia y Suecia.

93. El Canadá sigue adelante con la construcción de dos instalaciones de disposición final geológica. La primera, que está en la instalación del emplazamiento de Bruce para LLW y desechos de actividad intermedia (ILW) de la Ontario Power Generation, se encuentra actualmente en la fase de diseño, tras finalizar las audiencias públicas en 2003, y se prevé la adopción de una decisión en materia de reglamentación a finales de 2014 o principios de 2015. La segunda es un emplazamiento no definido para el Repositorio de Combustible Nuclear Gastado y Centro de Competencia del Canadá. La Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares ha estado trabajando con 21 comunidades voluntarias que expresaron interés en saber más sobre el plan del Canadá relativo a la gestión segura a largo plazo del combustible nuclear gastado, ha finalizado una primera fase de evaluación preliminar con ocho de esas comunidades y sigue realizando evaluaciones con las 13 restantes. Se estimó que cuatro de esas ocho comunidades iniciales cumplían las condiciones para pasar a la fase siguiente de la evaluación.

94. China siguió adelante con su plan a mediano plazo de gestionar sus LILW en cinco emplazamientos de disposición final regionales antes de 2020, con una capacidad total de disposición final de aproximadamente un millón de m³. Dos de ellos están en funcionamiento y sus capacidades actuales son de 20 000 m³ y 80 000 m³, el tercer emplazamiento está en construcción y los dos restantes aún no están en fase de desarrollo. Actualmente China prevé unas necesidades de disposición final geológica derivadas de 140 000 toneladas de combustible gastado de un conjunto de 48 reactores.

Tras el reprocesamiento se precisará una solución de disposición final para los HLW correspondientes. Los planes para avanzar hacia la disposición final geológica de HLW comprenden la selección de un emplazamiento (2014), la construcción (2017) y la explotación de un laboratorio de investigación subterráneo antes de 2020; la realización de actividades de I+D in situ y el inicio de la construcción de un repositorio geológico profundo antes de 2040; y el inicio de las operaciones de disposición final antes de 2050.

95. En Finlandia, Posiva espera recibir la licencia de construcción para su repositorio geológico profundo a finales de 2014 o principios de 2015, y se está preparando para llevar a cabo demostraciones en gran escala con miras a resolver las cuestiones científicas y técnicas restantes para obtener una licencia de explotación. Posiva prevé iniciar las operaciones a principios de 2020.

96. La Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos (ANDRA) de Francia está preparando la fase industrial de su proyecto de disposición final reversible de ILW y HLW, el proyecto Cigéo, y ha iniciado un estudio de viabilidad y un proceso formalizado de participación de los interesados públicos antes de presentar la solicitud de licencia. En 2013, los planes relativos a la instalación Cigéo llegaron a la fase de consulta pública final, organizada por la Commission nationale du débat public (la comisión nacional para el debate público). Tras una serie de protestas, fue necesario sustituir los planes iniciales relativos a las reuniones públicas por debates en línea. Se creó un comité de ciudadanos en el marco de este proceso, que posteriormente concluyó que a priori no se opondría al proyecto Cigéo. En espera de presentar la solicitud de licencia en 2015 y de recibir la licencia de construcción en 2018, ANDRA tiene previsto iniciar las actividades de disposición final antes de 2025.

97. Alemania aprobó una ley de selección de un emplazamiento para un repositorio en junio de 2013. Una comisión independiente dirigirá el proceso de selección del nuevo emplazamiento del repositorio para desechos generadores de calor. La instalación de prospección que se tuvo en cuenta anteriormente en Gorleben no está excluida de este nuevo proceso.

98. Tras una ceremonia de apertura en diciembre de 2012 comenzaron las operaciones regulares en la instalación de disposición final de Bataapáti, en Hungría, diseñada para recibir 40 000 m³ de LILW procedentes de la explotación de centrales nucleares. El diseño permite la construcción paralela de más cámaras de disposición final y, entretanto, los desechos se colocan en las cámaras existentes.

99. En la República de Corea, la construcción del Centro de disposición final de LILW de Wolsong (WLDC) ha casi finalizado y se prevé que la primera fase del centro, en la que tendrán cabida 100 000 bidones, esté lista en junio de 2014. El Gobierno puso en marcha una comisión para debatir públicamente las opciones de gestión futura del combustible gastado. El túnel subterráneo de investigación del KAERI se ampliará para dar cabida al programa de I+D previsto en apoyo de la disposición final geológica.

100. El repositorio cerca de la superficie para LLW de Lituania se encuentra actualmente en la fase de planificación detallada, y se ha previsto el inicio de la construcción del repositorio de VLLW para el segundo semestre de 2014. Hasta que se pueda proceder a la disposición final, los bultos de desechos están siendo colocados en una instalación de almacenamiento intermedio de 4 000 m³ que recibió una licencia de explotación del Cuerpo de Inspección Estatal de Seguridad de la Energía Nucleoeléctrica en mayo de 2013.

101. El Instituto Geológico Polaco ha iniciado los preparativos para poner nuevamente en marcha la elaboración de un programa de disposición final geológica. A la caracterización preliminar de emplazamientos a fin de seleccionar los emplazamientos candidatos para una instalación de disposición final cerca de la superficie seguirá una fase de consulta pública y administrativa local.

102. En la Federación de Rusia se está trabajando en el diseño de un laboratorio subterráneo en el macizo de granitoide de Nizhnekanskiy, a una profundidad de 500 m, en la región de Krasnoyarsk, en Siberia, para estudiar la posibilidad de someter a disposición final desechos de actividad alta e intermedia de período largo. La capacidad prevista es de 7 500 cofres de desechos generadores de calor y 155 000 m³ de desechos no generadores de calor. Se ha seleccionado el emplazamiento para una instalación de disposición final para LLW e ILW de período corto en la región de Leningrado, en una formación de arcilla a una profundidad de 60 a 70 metros bajo la superficie (figura A-15). Está diseñada para recibir durante la primera fase de las operaciones 50 000 m³ de LLW en salas de disposición final tipo cámara de almacenamiento.



Fig. A-15. Concepto de las operaciones de colocación de desechos en la instalación de disposición final de LLW prevista en la Federación de Rusia (Gráfico: Instituto de Diseño e Investigación de Tecnología de Energías Integradas de Rusia).

103. En Suecia se prevé que el proceso de concesión de la licencia para la instalación de disposición final de combustible gastado se prolongue varios años más. En septiembre de 2013, la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares SKB presentó para su examen el más reciente programa de investigación, desarrollo y demostración relativo a la disposición final geológica en Suecia, y actualmente está preparando cálculos revisados de los costos futuros del programa de gestión del combustible gastado. El Gobierno utilizará esta información como base para determinar las tasas que se deberán aportar al Fondo de Desechos Nucleares, con cargo al cual se está financiando este programa.

104. Suiza está revisando actualmente su norma sobre los fondos para clausura y disposición final. Las propuestas de modificación de las estimaciones de costos futuros incluyen una reducción de la tasa de inflación (del 3 % al 1,5 %) y del rendimiento de la inversión (del 5 % al 3,5 %) utilizadas en las estimaciones anteriores, así como la adición de un 30 % en concepto de “incertidumbres”. El Gobierno federal aprobó el amplio programa de gestión de desechos de la Nagra, que abarca los LILW y los HLW. En 2013 se presentaron propuestas para la ubicación de instalaciones cerca de la superficie y sigue adelante la fase 2 del proceso del plan sectorial que culminará con la selección de al menos dos emplazamientos para el repositorio de LILW y HLW.

105. Ucrania, en colaboración con la CE, está elaborando un plan nacional de disposición final geológica de desechos radiactivos y tiene previsto realizar evaluaciones de la seguridad preliminares de tres posibles emplazamientos antes de 2017. En la instalación de disposición final de LILW cerca de la superficie en Buryakovka, construida después del accidente de Chernóbil, se está procediendo a la ampliación en 120 000 m³ de la capacidad actual, de unos 700 000 m³, en el marco de un proyecto de reconstrucción financiado por la CE.

106. La región de Cumbria occidental del Reino Unido se retiró del proceso de selección de emplazamientos de disposición final geológica en enero de 2013. El Gobierno del Reino Unido sigue haciendo énfasis en el desarrollo de la disposición final geológica y está buscando propuestas sobre cómo revisar y mejorar el proceso de selección de emplazamientos.

107. En los Estados Unidos de América, el Panel 7 de la Planta piloto de aislamiento de desechos del DOE ha recibido la aprobación del Departamento de Medio Ambiente de Nuevo México para proceder a la disposición final de materiales de desecho del sector de la defensa que están contaminados con radioisótopos artificiales más pesados que el uranio. Partiendo de las recomendaciones de la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América, la estrategia nacional relativa a la gestión de los HLW y del combustible gastado prevé la construcción de instalaciones de almacenamiento provisional a escala experimental y a mayor escala, así como el logro de progresos demostrables en la selección y caracterización de emplazamientos de disposición final geológica. La NRC seguirá tramitando la solicitud de licencia del proyecto de Yucca Mountain.

Gestión de fuentes radiactivas selladas en desuso

108. Las opciones para la disposición final de las fuentes radiactivas selladas en desuso, entre ellas la disposición final conjunta con otros desechos en instalaciones apropiadas, las cada vez mayores opciones de reciclaje y repatriación, o la disposición final en pozos barrenados especiales, se están considerando seriamente en varios países, como por ejemplo Filipinas, Ghana, Malasia y Sudáfrica.

109. En 2013 se llevaron a cabo con éxito varias operaciones encaminadas a retirar fuentes radiactivas selladas en desuso de los locales de los usuarios y a someterlas a control, transportándolas ya sea a una instalación nacional de almacenamiento de desechos radiactivos o a otro lugar con las condiciones de almacenamiento adecuadas. La celda caliente móvil se utilizó en Filipinas en abril de 2013 para acondicionar 22 fuentes radiactivas selladas en desuso de actividad alta y almacenarlas en condiciones de seguridad tecnológica y física. En Bosnia y Herzegovina se recuperaron y retiraron del país para su reciclaje cinco fuentes radiactivas selladas en desuso. En varios Estados Miembros, entre ellos el Camerún, el Líbano y Marruecos, se inició la repatriación de fuentes en desuso de las categorías 1 y 2 fabricadas en Francia. En 2013 concluyó en el Sudán la repatriación de dos fuentes de ese tipo.

110. Se hicieron importantes esfuerzos para incorporar la celda caliente móvil a un concepto de diseño para la disposición final en pozos barrenados, con la intención de reducir al mínimo el manejo de las fuentes y evitar el transporte innecesario.

111. Se elaboraron varios documentos técnicos y módulos de capacitación que se utilizaron para ayudar a los Estados Miembros a adquirir competencia técnica en el acondicionamiento tecnológico y físicamente seguro de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5. En Egipto y Marruecos finalizaron las operaciones relacionadas con el acondicionamiento de este tipo de fuentes y se impartió capacitación a personal local y regional.

112. El Organismo amplió el acceso al Catálogo internacional de fuentes y dispositivos radiactivos sellados haciéndolo extensivo a muchos candidatos individuales designados por los países y a organismos internacionales como la Europol, para facilitar así la identificación de las fuentes radiactivas selladas en desuso halladas sobre el terreno.

113. En la Conferencia Internacional sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas: mantenimiento del control continuo a escala mundial de las fuentes durante todo su ciclo de vida, que se celebró en Abu Dhabi (Emiratos Árabes Unidos) en octubre de 2013, se destacó la persistencia de considerables desafíos en relación con la gestión y la disposición final de las fuentes radiactivas selladas en desuso, como la falta de bultos de transporte certificados, instalaciones de almacenamiento a largo plazo y orientaciones sobre la gestión al final de la vida útil.

A.4. Seguridad

114. En 2013 siguieron efectuándose mejoras relacionadas con la seguridad en las centrales nucleares de todo el mundo, como por ejemplo mediante la determinación y aplicación de las enseñanzas extraídas hasta el momento a raíz del accidente de Fukushima Daiichi. Se han hecho importantes progresos en varias esferas clave, como las evaluaciones de las vulnerabilidades de las centrales nucleares en materia de seguridad, la mejora de las capacidades de preparación y respuesta para casos de emergencia, el apoyo a los Estados Miembros que estudian la posibilidad de iniciar un programa nucleoelectrico, el fortalecimiento y mantenimiento de la creación de capacidad, y la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante. Los avances logrados en estas y otras esferas han contribuido a reforzar el marco mundial de seguridad nuclear.

115. El Organismo sigue compartiendo y difundiendo la información sobre las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi. El Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear, aprobado por la Conferencia General tras el accidente de Fukushima, continuó siendo el centro de las medidas de seguridad que adoptaron los Estados Miembros, la Secretaría y otras partes interesadas pertinentes. En 2013, el Organismo organizó la Reunión de Expertos Internacionales sobre clausura y restauración después de un accidente nuclear (28 de enero a 1 de febrero de 2013), la Reunión de Expertos Internacionales sobre los factores humanos y organizativos en la seguridad nuclear a la luz del accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi (21 a 24 de mayo de 2013), y la Conferencia Internacional sobre sistemas de reglamentación nuclear eficaces (8 a 12 de abril de 2013). En 2013, el Organismo publicó los informes titulados *IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident*, *IAEA Report on Strengthening Nuclear Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*, e *IAEA Report on Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*.

116. En la quincuagésima sexta reunión ordinaria de la Conferencia General, el Director General anunció que el Organismo preparará un informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi que habrá de estar terminado en 2014. El informe, entre otras cosas, abarcará la descripción y el contexto del accidente, la evaluación de la seguridad, la preparación y respuesta para casos de emergencia y las consecuencias radiológicas, así como la recuperación tras el accidente.

117. La seguridad operacional de las centrales nucleares sigue siendo alta, como muestran los indicadores de la seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La figura A-16 muestra el número de paradas de emergencia no previstas habidas cada 7 000 horas (aproximadamente un año) de funcionamiento. Suele utilizarse comúnmente como indicación del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales, en función de la reducción del número de transitorios termohidráulicos y de reactividad no deseados y no previstos que requieren una parada de emergencia del reactor. Como muestra la figura, en los últimos años se han logrado constantes mejoras. El aumento entre 2010 y 2011 guarda relación con el elevado número de paradas de emergencia desencadenadas por el terremoto de marzo de 2011 en el Japón.

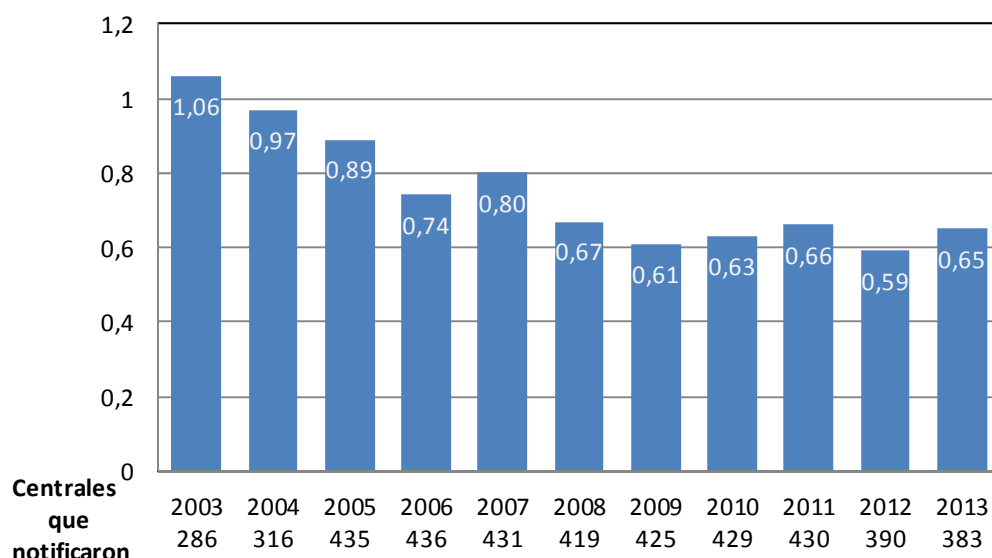


Fig. A-16. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales que se producen cada 7 000 horas de funcionamiento. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA <http://www.iaea.org/pris>).

118. Puede obtenerse más información sobre seguridad nuclear en el *Examen de la seguridad nuclear correspondiente a 2014*.

B. Fisión avanzada y fusión

B.1. Fisión avanzada

B.1.1. Reactores refrigerados por agua

119. En el Canadá, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear concluyó el tercer y último examen previo a la concesión de licencia respecto del diseño CANDU 6 mejorado (EC6) de 740 MW(e), que incorpora algunas mejoras de seguridad para cumplir las normas canadienses e internacionales más recientes. Candu Energy también finalizó 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. Se han concluido dos fases del examen previo a la concesión de la licencia para el ACR-1000. Candu Energy también está trabajando con asociados internacionales a fin de elaborar variantes del diseño EC6 para usar combustibles avanzados, como uranio reprocesado, y combustible de MOX y torio.

120. En China hay en construcción 29 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 los diseños más nuevos del AP-1000 y el reactor europeo de agua a presión (EPR). En febrero de 2013 se conectó a la red el Hongyanhe-1, un reactor nuevo de diseño CPR 1000. China prosigue el desarrollo de los diseños CAP-1400 y CAP-1700, que son versiones en gran escala del AP-1000. Al mismo tiempo, sigue invirtiendo en investigación para el diseño de un reactor chino refrigerado por agua supercrítica.

121. En Francia, AREVA continúa comercializando el EPR de 1 600+ MW(e). También está desarrollando el PWR ATMEA1 de 1 100+ MW(e), conjuntamente con la japonesa Mitsubishi Heavy Industries, y el reactor de agua en ebullición (BWR) KERENA de 1 250+ MW(e), en asociación con la alemana E.ON. Se prevé que el primer ATMEA1 sea el del emplazamiento de Sinop, en Turquía.

122. En la India hay cinco reactores en construcción: cuatro reactores evolutivos de agua pesada a presión (PHWR) de 700 MW(e) y un reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (WWER) de 1 000 MW(e). El Kudankulam-1 (WWER) fue conectado a la red en octubre de 2013 y se están efectuando los ensayos de puesta en marcha de la segunda unidad. El Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas está ultimando el diseño de un reactor avanzado de agua pesada (AHWR) de 300 MW(e), que utilizará combustible de MOX de UPE y torio con agua pesada como moderador, e incorporará tubos de presión verticales, y dispositivos de seguridad pasiva.

123. En el Japón hay dos reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR) en construcción. Hitachi-GE Nuclear Energy desarrolló versiones del ABWR de las clases 600 MW(e) y 900 MW(e) (ABWR-600 y ABWR-900) para satisfacer necesidades variadas. La Corporación Toshiba modificó el ABWR a fin de cumplir los requisitos de los Estados Unidos y Europa, y desarrolló respectivamente el US-ABWR y el EU-ABWR. El Japón prosigue sus actividades de investigación y desarrollo en la esfera de los diseños de SCWR innovadores.

124. En la República de Corea, la construcción del primer reactor de potencia avanzado, el APR-1400, progresa según el plan. Está en curso el proceso de certificación del diseño del APR-1400, habiéndose presentado ante la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos la solicitud correspondiente en octubre de 2013. Paralelamente, en 2013 continuó el desarrollo del APR+ de 1 500 MW(e) y el APR-1000.

125. En los Estados Unidos de América hay cinco PWR en construcción, entre ellos cuatro reactores AP1000. La Comisión Reguladora Nuclear continúa examinando las solicitudes de certificación del diseño para el reactor económico simplificado de agua en ebullición (GE-Hitachi Nuclear Energy), el US-EPR (AREVA NP) y el US-APWR (Mitsubishi Heavy Industries).

126. En la Federación de Rusia prosiguió la construcción de siete reactores WWER, a saber, dos WWER-1000 y cinco WWER-1200 (NPP-2006). Siguieron adelante los planes para desarrollar el WWER-1200A, así como el WBER-600, el WWER-600 (NPP-2006/2) y el WWER-1800, sobre la base del 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 reactor flotante de pequeña potencia para aplicaciones especializadas.

B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos

127. Desde hace mucho tiempo se reconoce la importante función que desempeñan los reactores rápidos y los ciclos del combustible conexos para la sostenibilidad a largo plazo de la energía nucleoelectrica. La razón de reproducción positiva alcanzable y el reciclado múltiple del material fisible obtenido del combustible gastado de los reactores rápidos permite hacer pleno uso del potencial energético del uranio y el torio. Esta tecnología garantiza el suministro de energía para miles de años y aumenta en gran medida la sostenibilidad de la energía nucleoelectrica al reducir los desechos nucleares de actividad alta y período largo.

128. Sin embargo, la satisfactoria utilización en gran escala de los reactores rápidos sólo puede lograrse si la investigación y el desarrollo tecnológico pueden crear las condiciones para asegurar que se desarrolle plenamente el potencial de los sistemas de neutrones rápidos y los ciclos cerrados del combustible conexos, y si se satisfacen adecuadamente los criterios de competitividad económica, requisitos de seguridad cada vez más rigurosos, desarrollo sostenible y aceptabilidad pública.

129. Desde 1960 se han implementado en todo el mundo importantes programas de desarrollo y utilización de reactores rápidos que han hecho que los conocimientos sobre los reactores rápidos y las tecnologías del ciclo del combustible conexas alcancen un alto grado de madurez. La tecnología de reactores rápidos más madura es el reactor rápido refrigerado por sodio (SFR). Su historia es la de 350 años-reactor de experiencia adquirida a través del diseño, la construcción y la explotación de SFR experimentales, prototípicos, de demostración y de tamaño comercial que hay en funcionamiento en varios países, como Alemania, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido. En líneas generales, los resultados de los SFR han sido notables, con logros importantes, como la demostración de la viabilidad de la reproducción de combustible nuevo a través del ciclo del combustible de los reactores rápidos, con eficiencias térmicas que alcanzan valores del 43–45 %, los más elevados en la esfera nuclear. Asimismo, la clausura de varios de estos reactores ha permitido acumular experiencia indispensable.

130. Actualmente hay cuatro SFR en funcionamiento: el Reactor Experimental Rápido de China, en China; el reactor reproductor rápido de ensayo, en la India; y los reactores BOR-60 y BN-600, en la Federación de Rusia. Hay dos SFR en régimen de parada temporal, Joyo y Monju, en el Japón. Se prevé que en 2014 se termine la construcción de dos SFR: el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e) en la India (figura B-1) y el reactor comercial de 880 MW(e) BN-800, en la Federación de Rusia.



Fig. B-1. Prototipo de reactor reproductor rápido en fase avanzada de construcción en Kalpakkam (India). (Fotografía: Centro de Investigaciones Atómicas Indira Gandhi).

131. En la Federación de Rusia se ha reunido algo de experiencia con metales líquidos pesados, como el plomo o la mezcla eutéctica plomo-bismuto, a partir de la explotación de siete submarinos nucleares Project 705/705K equipados con un reactor refrigerado por Pb-Bi de 155 MW(t).

132. A nivel nacional o internacional se están desarrollando cuatro tipos diferentes de reactores rápidos (cuadro B-1) para cumplir normas de seguridad, sostenibilidad, economía, protección física y resistencia a la proliferación más estrictas. Estos son: el reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), el reactor rápido refrigerado por plomo, el reactor rápido refrigerado por gas y el reactor rápido de sales fundidas (MSFR).

Cuadro B-1. Diseños de reactores rápidos

Diseños	Tipo	Potencia	Diseñadores
CFR-600	SFR, reactor de tipo piscina	600 MW(e)	Instituto de Energía Atómica de China (China)
Astrid	SFR, prototipo de reactor de tipo piscina	600 MW(e)	Comisariado de Energía Atómica y Energías Alternativas, EDF, AREVA NP, Alstom, Bouygues, Comex Nucléaire, Toshiba, Jacobs, Rolls-Royce y Astrium Europe (Francia)
FBR-1 y 2	SFR, reactor de tipo piscina	500 MW(e)	Centro de Investigaciones Atómicas Indira Gandhi (India)
4S	SFR, reactor de pequeña potencia	10 MW(e)	Toshiba (Japón)
JSFR	SFR, reactor de tipo bucle	750 MW(e) (escala mediana), 1 500 MW(e) (gran escala)	Organismo de Energía Atómica del Japón (Japón)
PGSFR	SFR, prototipo de reactor de tipo piscina	150 MW(e)	Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea (República de Corea)
BN-1200	SFR, reactor de tipo piscina	1 220 MW(e)	Oficina de Diseño Experimental para la Construcción de Maquinaria (Federación de Rusia)
MBIR	SFR, reactor de investigación de tipo piscina	100 MW(e)	Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (Federación de Rusia)
PRISM	SFR, reactor de tipo piscina	311 MW(e)	GE-Hitachi (Estados Unidos de América)
TWR-P	SFR, reactor de onda progresiva	600 MW(e)	TerraPower (Estados Unidos de América)
MYRRHA	LFR, reactor de investigación de plomo-bismuto de tipo piscina	-	Centro de Estudios de Energía Nuclear (Bélgica)
CLEAR-I	LFR, reactor de investigación de plomo-bismuto de tipo piscina	-	Instituto de Tecnología de la Seguridad de la Energía Nuclear (China)
ALFRED	LFR, planta de demostración de plomo de tipo piscina	125 MW(e)	Ansaldo Nucleare (Europa/Italia)
ELFR	LFR, reactor de plomo de tipo piscina	630 MW(e)	Ansaldo Nucleare (Europa/Italia)
PEACER	LFR, planta de demostración de plomo-bismuto de tipo piscina	300 MW(e)	Universidad Nacional de Seúl (República de Corea)
BREST-OD-300	LFR, reactor de plomo de tipo piscina	300 MW(e)	Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (Federación de Rusia)
SVBR-100	LFR, reactor modular de pequeña potencia de plomo-bismuto	101 MW(e)	AKME-Ingeniería (Federación de Rusia)
ELECTRA	LFR, reactor de plomo de enseñanza	-	Instituto Real de Tecnología (Suecia)
G4M	LFR, reactor modular de pequeña potencia de plomo-bismuto	25 MW(e)	Gen4 Energy Inc. (Estados Unidos de América)
ALLEGRO	GFR, reactor experimental	-	Comunidad Europea de la Energía Atómica (Europa)
EM ²	GFR, reactor de alta temperatura	240 MW(e)	General Atomics (Estados Unidos de América)
MSFR	MSFR	1 500 MW(e)	Centro Nacional de Investigación Científica (Francia)

B.1.3. Reactores refrigerados por gas

133. En el Reino Unido ha habido reactores comerciales refrigerados por gas en funcionamiento durante muchos años. En el país todavía hay en explotación un reactor Magnox y 14 reactores avanzados refrigerados por gas, que siguen cumpliendo una importante función en la esfera de los reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR) y prestan apoyo a los explotadores y a numerosas universidades técnicas en relación con la manera de abordar los desafíos de los HTGR. Los HTGR se diferencian de los reactores refrigerados por gas de CO₂ del Reino Unido básicamente por el uso de combustible de partículas revestidas, las mayores temperaturas de salida del gas (≥ 750 °C) y el empleo de helio como refrigerante. En contraste con el declive de los HTGR en el Reino Unido, muchos Estados Miembros siguen trabajando en su desarrollo.

134. En China, en diciembre de 2012 comenzó el vertido del hormigón del reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) (figura B-2), tras cumplir los requisitos de la revaluación de la seguridad a la luz del accidente de Fukushima Daiichi. Esta central industrial de demostración de 200 MW(e) consta de dos unidades de reactor de 250 MW(t) que previsiblemente estarán en funcionamiento a finales de 2017.



Fig. B-2. Lugar donde se construye el HTR-PM en la bahía de Shidao, ciudad de Weihai (China). (Fotografía: Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías).

135. La tecnología de fabricación de combustible china está establecida y las esferas de combustible se están probando a nivel internacional en condiciones normales y de accidente. En 2013 se inició la construcción de la nueva planta de fabricación de combustible en Baotou y se realizarán pruebas a plena escala de los componentes principales en el circuito de experimentación de helio de 10 MW concluido. El reactor de investigación HTR-10 fue modernizado en 2013 y se utilizará para adquirir más experiencia operacional, recopilar datos y efectuar pruebas.

136. La Agencia Nacional de Energía Nuclear (BATAN) de Indonesia tiene en estudio un diseño conceptual para un HTGR, adecuado para su instalación fuera de las islas de Java, Madura y Bali. Las actividades se centran en un estudio de demanda, economía, calor industrial y fabricación de combustible.

137. En el Japón se está llevando a cabo el examen reglamentario del reactor experimental de alta temperatura (HTTR) de 30 MW(t). Está previsto que se realicen más pruebas de demostración de la seguridad en relación con la pérdida de refrigeración primaria forzada más la pérdida de refrigeración de la vasija, simulando un apagón de la central. En respuesta al accidente de Fukushima Daiichi, el Organismo de Energía Atómica del Japón ha empezado a diseñar un HTGR naturalmente seguro basado íntegramente en elementos de seguridad inherentes y un HTGR de quemado limpio para quemar el excedente de plutonio en el Japón. Continúa la labor de desarrollo relativa a la producción de hidrógeno.

138. La República de Corea sigue invirtiendo en instalaciones de ensayo para un HTGR destinado a la producción de hidrógeno. También hay previstas, en cooperación con los usuarios de calor industrial, aplicaciones de este tipo. El desarrollo del combustible de partículas revestidas avanza bien y se efectuarán irradiaciones de prueba en el reactor avanzado de alto flujo neutrónico (HANARO).

139. Prosiguió la labor relacionada con el proyecto conjunto Rusia-Estados Unidos de reactor modular de turbina de gas refrigerado por helio (GT- MHR), para someter a disposición final el plutonio apto para armas utilizándolo para la producción de electricidad y para aplicaciones de calor industrial. La atención se centra en las tecnologías clave para el reactor, como combustible, grafito, materiales a alta temperatura, un sistema de conversión de potencia con una turbina a gas y otros sistemas del reactor.

140. En Ucrania, una decisión del Gobierno permitió la posible utilización de los HTGR, lo que revitalizó las actividades de investigación conexas sobre el equipo industrial y las tecnologías.

141. En los Estados Unidos de América, el proyecto de la central nuclear de la próxima generación se centra en la cualificación del combustible tri-isotópico, la cualificación del grafito y materiales a alta temperatura, las instalaciones de ensayo para ilustrar las características de seguridad pasiva y la elaboración del marco de concesión de licencias. El combustible fabricado más recientemente ha demostrado un comportamiento excelente durante la irradiación a altas temperaturas operativas (1 250 °C) y con un quemado muy elevado (19 % de fisiones por átomo metálico inicial), y a temperaturas de accidente de hasta 1 800 °C, demostrando una mayor seguridad y grandes márgenes en los diseños de reactores y el comportamiento del combustible. La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos se ha centrado en resolver cuestiones en las esferas de concesión de licencias, específicamente en la selección de los sucesos base, la determinación de términos fuente, el comportamiento funcional de la contención y la planificación para casos de emergencia.

142. El Organismo ha estado llevando a cabo dos proyectos coordinados de investigación relacionados con los HTGR, uno sobre la mejora de los conocimientos respecto del comportamiento de la fluencia por irradiación del grafito nuclear y otro sobre análisis de incertidumbre en física, termohidráulica y empobrecimiento de los reactores HTGR.

143. El proyecto de la CE de I+D sobre reactores avanzados de alta temperatura para la cogeneración de calor y electricidad tiene por objetivo ampliar la tecnología europea de HTGR para apoyar la cogeneración nuclear con énfasis en los aspectos de seguridad del sistema primario acoplado a una aplicación industrial. En Polonia se aprobó un proyecto patrocinado por el Gobierno para investigar las posibilidades de construir un sistema HTGR. Las actividades en Alemania se limitan a determinadas actividades de investigación en la esfera de la seguridad y a la participación en los programas de la CE relacionados con HTGR. En los Países Bajos, el Grupo de Investigación Nuclear y Consultoría, en Petten, y la Universidad Tecnológica de Delft prestan apoyo a los programas de la CE.

144. En la AEN de la OCDE se está llevando a cabo un análisis comparado a partir del acoplamiento de los códigos de neutrónica y los códigos de fluidos térmicos para el cálculo de transitorios en el diseño del núcleo prismático para reactores HTGR, a fin de estudiar las condiciones operacionales y de accidente que comprenden escenarios con pérdida de refrigerante y entrada de humedad.

B.1.4. Reactores de pequeña y mediana potencia

145. Los reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP) son potencialmente una fuente de generación de electricidad para los Estados Miembros que tienen comunidades relativamente aisladas o redes eléctricas con limitaciones. Los RPMP podrían asimismo ser una manera eficaz de sustituir las fuentes de electricidad obsoletas, envejecidas o con altas emisiones de carbono sin necesidad de hacer modificaciones importantes en la infraestructura existente. Los Estados Miembros han observado que la desalación del agua de mar utilizando energía nuclear ha quedado satisfactoriamente demostrada

mediante varios proyectos realizados en algunos Estados Miembros y que es en general eficaz en función del costo, reconociendo al mismo tiempo que los aspectos económicos de la aplicación dependerán de factores específicos de cada emplazamiento. Los RPMP también se consideran una posible opción tecnológica para la cogeneración.

146. Según la clasificación adoptada por el Organismo, los reactores de pequeña potencia son reactores con una potencia eléctrica inferior a 300 MW(e) y los reactores de mediana potencia son reactores con una potencia eléctrica de entre 300 MW(e) y 700 MW(e). Actualmente se están construyendo cuatro RPMP avanzados en cuatro países, a saber: la Argentina, China, la India y la Federación de Rusia. Se están desarrollando RPMP para todas las principales líneas de reactores, como por ejemplo LWR, reactores de agua pesada (HWR), HTGR y reactores rápidos de metal líquido (LMFR). En el desarrollo ha habido una tendencia a utilizar reactores nucleares avanzados de pequeña potencia como una central eléctrica con múltiples módulos. Algunos RPMP refrigerados por agua adoptan para su sistema primario el enfoque integral, en el cual los componentes del sistema nuclear de generación de vapor están instalados en una vasija común junto con el núcleo del reactor. En las partes correspondientes del presente documento se ofrece información sobre los progresos en el desarrollo y la utilización de los HTGR de pequeña potencia y los reactores rápidos refrigerados por metal líquido pesado. Varios países están avanzando en el desarrollo y la aplicación de centrales nucleares transportables, entre ellas RPMP flotantes y en el mar.

147. Aproximadamente 45 conceptos de RPMP innovadores se encuentran en distintas etapas de investigación y desarrollo. Algunos de los diseños de RPMP refrigerados por agua que se están preparando para su utilización a corto plazo se describen en los párrafos siguientes.

148. En la Argentina ha comenzado la construcción del reactor CAREM, un diseño de LWR de pequeña potencia, a presión, de tipo integrado, con todos los componentes primarios situados dentro de la vasija del reactor y con una potencia eléctrica de 150-300 MW(e). Ya ha concluido la excavación del emplazamiento para el prototipo de central CAREM-25 de 27 MW(e). El Gobierno otorgó la licencia de construcción del CAREM-25 en octubre de 2013. Se prevé que el primer vertido de hormigón se efectúe en el primer trimestre de 2014.

149. China ha desarrollado reactores de agua a presión de 300 MW(e) y 600 MW(e). Ya se han instalado varias unidades y hay tres unidades CNP-600 en construcción. El Pakistán también ha instalado dos unidades CNP-300 importadas de China y tiene en construcción dos unidades CNP-300 adicionales. Además, la CNNC ha estado desarrollando el ACP-100 que genera 100 MW(e), un RPMP de tipo PWR integrado con bombas montadas horizontalmente dentro de la vasija del reactor. China tiene planes de construir dos unidades ACP-100 en la provincia de Fujian destinadas a la producción de electricidad y la desalación de agua de mar. El Instituto de Investigación y Diseño de Ingeniería Nuclear de Shanghai ha estado desarrollando el CAP-150, un reactor avanzado de pequeña potencia de 150 MW(e) que adopta características de seguridad pasiva, y un RPMP flotante de 200 MW(t), el CAP-FNPP.

150. En Francia, DCNS está desarrollando Flexblue, un reactor transportable de pequeña potencia y diseño modular, de 160 MW(e). Este reactor refrigerado por agua, que funciona en el fondo marino, utiliza tecnologías nucleares pasivas, navales y de alta mar para sacar provecho del mar, que es un sumidero de calor infinito y permanentemente disponible.

151. En la India hay en funcionamiento o en construcción muchos HWR de 220 MW(e), 540 MW(e) y 700 MW(e). El AHWR de 304 MW(e) que está desarrollando el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas se encuentra en la fase de diseño detallado.

152. En Italia, prosigue en la Universidad Politécnica de Milán el desarrollo del diseño del reactor internacional innovador y seguro (IRIS), que anteriormente desarrollaba un consorcio encabezado por Westinghouse Corporation. El IRIS es un LWR de configuración modular con sistema primario

integrado que produce una energía eléctrica media de 335 MW(e). El concepto del reactor está diseñado para satisfacer los requisitos de mayor seguridad, mejor economía, resistencia a la proliferación y minimización de desechos.

153. En el Japón se ha desarrollado un LWR de mediana potencia de 350 MW(e) con un sistema primario integrado, denominado reactor modular integrado refrigerado por agua (IMR). Los ensayos de validación, las actividades de investigación y desarrollo en relación con componentes y métodos de diseño, y el desarrollo del diseño básico están en curso para apoyar la concesión de licencias. El IMR está diseñado con fines tanto de producción de electricidad como de cogeneración.

154. 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). El SMART está concebido para un uso combinado de generación de electricidad y desalación de agua de mar. Se puso en marcha un proyecto de diseño de planta piloto para la verificación exhaustiva del comportamiento. En julio de 2012, el SMART de 100 MW(e) obtuvo la aprobación del diseño estándar de la Comisión de Seguridad Nuclear Tecnológica y Física y actualmente está en preparación la construcción de la primera central de ese tipo.

155. La Federación de Rusia está terminando de construir una central nuclear montada en una plataforma flotante con dos reactores KLT-40S de 35 MW(e) que se utilizarán para la cogeneración de electricidad y calor industrial. El KLT-40S se basa en la central de propulsión marina KLT-40 comercial y es una variante avanzada del reactor que alimenta los rompehielos nucleares. El ABV-6M de 50 MW(e) se encuentra en la fase de diseño detallado. Es un LWR a presión integrado, con circulación natural del refrigerante primario. El RITM-200 de 50 MW(e), que actualmente se halla en la fase de diseño detallado, es un reactor integrado de circulación forzada para rompehielos nucleares.

156. En los Estados Unidos de América se están desarrollando cuatro PWR integrados. El reactor B&W mPower es un diseño de central bimodular de 180 MW(e) por módulo. NuScale Power proyecta una central nuclear compuesta por doce módulos de 45 MW(e). El Westinghouse SMR es un diseño conceptual de 225 MW(e) que incorpora sistemas de seguridad pasiva y componentes demostrados del AP-1000. El Holtec SMR-160 es un reactor de 160 MW(e) que se basa en la convección natural, eliminando así la necesidad de bombas de refrigerante y la dependencia de fuentes de energía externas. Está previsto que entre 2014 y 2016 se presenten a la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos las solicitudes para el examen de la certificación del diseño de los cuatro conceptos.

157. En 2012 el Organismo publicó el folleto titulado *Status of Small and Medium Sized Reactor Designs*¹⁵ como suplemento del Sistema de información sobre reactores avanzados (ARIS) del Organismo. En el cuadro B.2 se enumeran los diseños de RPMP refrigerados por agua disponibles para su utilización a corto y medio plazo.

¹⁵ Disponible en: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/smr-status-sep-2012.pdf>.

Cuadro B.2 Diseños de RPMP refrigerados por agua disponibles para su utilización a corto y medio plazo.

Diseño	Tipo	Potencia [MW(e)]	Diseñadores	Situación
CAREM-25	PWR integrado, circulación natural	27	Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina)	Prototipo de una unidad en construcción
CNP-300	PWR de dos bucles	315	CNNC (China)	Tres unidades en funcionamiento, dos en construcción
ACP-100	PWR integrado	100	Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) (China)	Diseño detallado
CAP-150	PWR integrado	150	SNERDI (China)	Diseño conceptual
Flexblue	Reactor modular de pequeña potencia anclado al fondo marino	160	DCNS (Francia)	Diseño conceptual
AHWR300-LEU	Tubo de presión	304	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (India)	Diseño detallado
IMR	PWR modular integrado, circulación natural	335	Mitsubishi Heavy Industries Ltd (Japón)	Diseño conceptual
SMART	PWR integrado	100	Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea (República de Corea)	Aprobación del diseño estándar otorgada en julio de 2012
ABV-6M	PWR integrado, circulación natural	8,6	Oficina de Diseño Experimental para la Construcción de Maquinaria (OKBM) (Federación de Rusia)	Diseño detallado
VBER-300	PWR integrado	325	OKBM (Federación de Rusia)	Diseño detallado
RITM-200	PWR integrado	50	OKBM (Federación de Rusia)	Diseño detallado
KLT-40S	Central nuclear flotante — montada en plataforma flotante	70	OKBM (Federación de Rusia)	Dos unidades en fase final de construcción
WWER-300	PWR integrado	300	Gidropress (Federación de Rusia)	Diseño detallado
VK-300	BWR	250	Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (Federación de Rusia)	Diseño conceptual
UNITHERM	PWR integrado, de muy poca potencia, con circulación natural	2,5	Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (Federación de Rusia)	Diseño conceptual

Diseño	Tipo	Potencia [MW(e)]	Diseñadores	Situación
Shelf	Reactor modular de pequeña potencia anclado al fondo marino	6	Instituto de Investigación y Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (Federación de Rusia)	Diseño conceptual
IRIS	PWR integrado	335	IRIS International Consortium (Italia)	Diseño conceptual
B&W mPower	PWR integrado (dos módulos de 180 MWe)	360	B&W Generation mPower (Estados Unidos de América)	Diseño detallado
NuScale	PWR integrado de circulación natural (12 módulos de 45 MWe)	45	NuScale Power (Estados Unidos de América)	Diseño detallado
Westinghouse SMR	PWR integrado	225	Westinghouse Electric Corporation (Estados Unidos de América)	Diseño detallado
Holtec SMR-160	PWR integrado	160	Holtec Corporation (Estados Unidos de América)	Diseño detallado

B.1.5. Iniciativas internacionales relativas a los sistemas de energía nuclear innovadores

158. Debido a las crecientes preocupaciones sobre la disponibilidad de recursos energéticos, el cambio climático y la seguridad energética, y puesto que la energía nuclear puede hacer una aportación importante en la tarea de satisfacer la creciente demanda mundial de energía, en los últimos decenios se han puesto en marcha diversas iniciativas internacionales en relación con los sistemas de energía nuclear innovadores.

159. En particular, con el nuevo siglo, varios Estados Miembros del Organismo reconocieron la necesidad de actuar para asegurar que el desarrollo de la energía nuclear se hiciera de forma sostenible. Como resultado de ello, en 2000 se inició el Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) como proyecto del Organismo, de acuerdo con una resolución de la Conferencia General, a fin de ayudar a asegurar la disponibilidad de energía nuclear para satisfacer las necesidades mundiales de energía en el siglo XXI de manera sostenible. El objetivo principal era reunir a los propietarios y a los usuarios de tecnologías a fin de que analizaran juntos las medidas internacionales y nacionales necesarias para lograr las innovaciones deseadas en los reactores nucleares y los ciclos del combustible. El Grupo del INPRO está financiado principalmente por los 38 Estados Miembros que son miembros del INPRO y la CE, que también lo es. Kenya se unió al INPRO en 2013 y pasó a ser el 39º miembro.

160. El INPRO está revisando su metodología, que adopta un enfoque holístico para evaluar los sistemas de energía nuclear innovadores en siete esferas: la economía, la infraestructura, la gestión de desechos, la resistencia a la proliferación, la protección física, el medio ambiente y la seguridad. Belarús finalizó una evaluación de los sistemas de energía nuclear (NESA) basada en esta metodología y el Organismo publicó el informe como documento de referencia para los Estados Miembros. Se están realizando NESA en Indonesia, Rumania y Ucrania.

161. El Foro Internacional de la Generación IV (GIF) es el resultado de un esfuerzo internacional de cooperación realizado con el fin de llevar a cabo las actividades de investigación y desarrollo necesarias para determinar la viabilidad y la capacidad de rendimiento de la próxima generación de

sistemas de energía nuclear. Con sus 13 miembros, el GIF se centra en seis sistemas de energía nuclear, tal como se describe en su documento titulado *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*¹⁶, publicado en 2002: los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR), los reactores de muy alta temperatura (VHTR), los reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR), los reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), los reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR) y los reactores de sales fundidas (MSR).

162. Los miembros del GIF interesados en realizar actividades de I+D en cooperación sobre uno o más de los sistemas seleccionados han firmado los correspondientes acuerdos sobre sistemas. En cada uno de esos acuerdos se ha establecido un número limitado de proyectos comunes de I+D con productos, hitos y plazos bien definidos, y dentro de un marco contractual claramente establecido.

163. El GIF y el INPRO celebran reuniones anuales de coordinación que se centran en metodologías de evaluación específicas en los ámbitos de la economía, la resistencia a la proliferación y la protección física, los riesgos y la seguridad, así como la simulación avanzada.

164. Otra actividad importante iniciada en 2011 por el GIF, en cooperación con el Organismo, en la esfera de los SFR es la elaboración de criterios de diseño de seguridad destinados a armonizar los requisitos de seguridad entre las organizaciones de diseño representadas en el GIF, así como la cuantificación del alto grado de seguridad que se espera de los sistemas de SFR de la Generación IV. El GIF publicó en 2013 la fase 1 de un informe sobre los criterios de diseño de seguridad que está siendo examinada actualmente por el OIEA, la AEN de la OCDE, el Programa multinacional de evaluación del diseño (MDEP) y algunos reguladores de los Estados Miembros del GIF. En la fase 2 de ese informe se cuantificarán los criterios de diseño y se incluirá la elaboración de directrices detalladas sobre cómo aplicar los criterios generales.

165. El ámbito de trabajo del GIF abarca las fases de viabilidad y ejecución de las actividades de I+D, no la fase de demostración. Por consiguiente, los prototipos no son una de las prerrogativas del Foro.

166. La Plataforma Tecnológica para la Energía Nuclear Sostenible (SNE-TP) fue inaugurada oficialmente en la Unión Europea en 2007 con el fin de promover la investigación, el desarrollo y la demostración de las tecnologías de fisión nuclear necesarias para cumplir el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (Plan EETE).

167. Actualmente, la SNE-TP reúne a más de 100 partes interesadas europeas procedentes de la industria, la investigación, el sector académico, organizaciones técnicas de seguridad, organizaciones no gubernamentales, así como a representantes nacionales. Las actividades se centran en el mantenimiento de la seguridad y la competitividad en la tecnología de fisión, la presentación de soluciones duraderas en relación con la gestión de desechos radiactivos para el año 2020, la finalización de la demostración de una nueva generación de reactores de fisión más sostenibles, y la ampliación de las aplicaciones de la fisión nuclear además de la producción de electricidad antes de 2050.

168. La Iniciativa Industrial Europea sobre Fisión Nuclear Sostenible (ESNII), que la UE puso en marcha en 2010, se ocupa de las necesidades europeas en relación con la demostración de las tecnologías de reactores de neutrones rápidos de la Generación IV, junto con las infraestructuras de investigación, las instalaciones de combustible y las actividades de I+D complementarias. Su labor se centra en el desarrollo de dos tecnologías paralelas: la tecnología del reactor de neutrones rápidos refrigerado por sodio como solución de referencia, con la construcción de un prototipo hacia 2020 en Francia que apoye decididamente esta tecnología, y una tecnología alternativa - ya sea un reactor

¹⁶ Disponible en: <http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>.

rápido refrigerado por plomo o uno refrigerado por gas - con la construcción de un reactor experimental para demostrar la tecnología, en otro país europeo que desee acoger este programa.

B.1.6. Cogeneración para aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear

169. La unión de los reactores nucleares y las aplicaciones industriales, es decir, la cogeneración nuclear, tiene varias ventajas prácticas, como las economías que se logran al reutilizar el calor residual de las centrales nucleares, el aumento de la eficiencia térmica global de las centrales, la mayor flexibilidad de la red eléctrica, y la reducción de las emisiones de GEI y del impacto ambiental. En general, todos los reactores nucleares pueden utilizarse para aplicaciones no eléctricas. En función de la tecnología, el tipo de reactor, el tipo de combustible y la temperatura puede haber distintos procesos de cogeneración. Parte del calor que se suele descargar en el medio ambiente puede utilizarse con fines de desalación y calefacción urbana como ciclo de fondo. Por consiguiente, la eficiencia total en la utilización del calor puede aumentarse hasta el 70-80 %, frente al 33 % que se alcanza aproximadamente con los LWR existentes. Los LWR, los SCWR y los LMFR son candidatos aptos para la cogeneración con aplicaciones de calor industrial de baja temperatura como la calefacción urbana y los sistemas de desalación. Los reactores de alta temperatura, por ej. los HTGR, los GFR y los MSR, son más adecuados para la cogeneración con aplicaciones de calor industrial de alta temperatura y para la producción de hidrógeno. El enfoque de ciclo indirecto se considera adecuado para todos los reactores (véase la figura B-3).

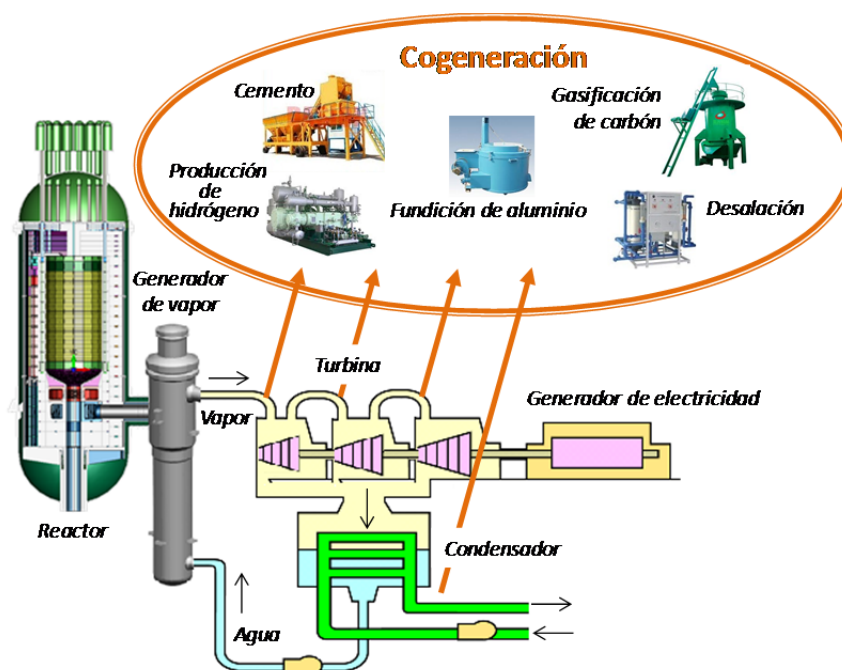


Fig. B-3 Representación esquemática de la cogeneración.

170. La cogeneración constituye una opción ideal para muchas aplicaciones que requieren gran cantidad de energía, como la síntesis de combustible (comprendida la producción de hidrógeno), la gasificación de carbón y la extracción de petróleo. La energía nuclear puede constituir una opción importante para satisfacer el potencial del mercado en relación con las opciones de cogeneración. En la gama de temperaturas bajas, la calefacción urbana (80 a 150 °C) y la desalación de agua de mar (65 a 120 °C) son las aplicaciones más obvias. En la gama de temperaturas medias, existe un gran número de aplicaciones del calor, como el refinado del petróleo y el procesamiento de la lutita bituminosa y la arena petrolífera. La demanda de calor de alta temperatura suele darse en la producción de petroquímicos, acero e hidrógeno.

171. La viabilidad técnica y comercial de los LWR ha quedado demostrada en numerosas plantas en funcionamiento de diversos países durante más de 30 años. Bulgaria, Eslovaquia, la Federación de Rusia, Hungría, Suiza y Ucrania, en las que la calefacción urbana mediante centrales alimentadas con combustibles fósiles es una práctica común también disponen de sistemas de calefacción urbana acoplados a centrales nucleares. La capacidad de generación de calor de estas centrales nucleares oscila entre 20 MW (t) y 250 MW (t), en general una pequeña fracción de la potencia térmica total del reactor. El agua o el vapor utilizados para la calefacción urbana se calientan hasta 130-150 °C con el vapor extraído de la turbina.

172. Se ha procedido a la desalación mediante la cogeneración con centrales de LWR en los Estados Unidos de América y el Japón y con el reactor rápido BN-350 refrigerado por sodio en Kazajistán. En el Japón todas las centrales nucleares se encuentran en emplazamientos junto al mar. Varias centrales nucleares explotadas por la Compañía de Energía Eléctrica de Kansai, la Compañía de Energía Eléctrica de Kyushu y la Compañía de Energía Eléctrica de Shikoku cuentan con sistemas de desalación de agua de mar que utilizan el calor y/o la electricidad de la central nuclear para hacer funcionar los sistemas de aporte de agua de alimentación para los generadores de vapor y suministrar agua potable en el emplazamiento. Se han utilizado procesos de desalación por destilación por múltiple efecto, destilación súbita multietapa (MSF) y ósmosis inversa. Las capacidades individuales de desalación oscilan entre 1 000 y 3 000 m³ diarios.

173. La cogeneración para aplicaciones industriales quedó demostrada por la central nuclear de Stade de Alemania, un PWR de 1 892 MW(t) y 640 MW(e) que suministró vapor a una refinería de sal situada a 1,5 km de distancia. El suministro de vapor por la central nuclear tuvo un grado de disponibilidad muy elevado y la experiencia operativa entre 1983 y 2003 fue buena. Otro ejemplo es el PWR de 970 MW(e) de la central nuclear de Gösgen en Suiza, que ha estado suministrando vapor industrial a una fábrica de cartón cercana desde 1979. Ese vapor se genera en un ciclo de vapor terciario mediante el vapor vivo extraído del PWR. A continuación se canaliza hasta la fábrica, a una distancia de 1,75 km. También se utiliza con fines de calefacción urbana la central nuclear de Beznau en Suiza, con sus dos unidades de PWR de 365 MW(e).

174. La cogeneración también se ha demostrado con reactores CANDU. Por ejemplo, la central nuclear de Bruce (Canadá) suministró calor destinado a la producción de agua pesada, generando al mismo tiempo electricidad durante dos décadas. En 2008 se acopló a la central nuclear de Madras en Kalpakkam (India) una planta de desalación con una capacidad de 6 300 m³ diarios. El proceso híbrido de desalación combina la MSF y la ósmosis inversa. La mezcla de agua final se suministra para usos industriales/municipales. Al utilizar un MW(e) de energía termoeléctrica, puede producir 1 500 m³ diarios de agua con la MSF y 1 800 m³ diarios mediante la ósmosis inversa. Por tanto, tras la modificación retroactiva se logrará producir 6 300 m³ diarios con una reducción de aproximadamente 4 MW de la electricidad generada mediante energía nucleoelectrica. En 2010, el Pakistán puso en servicio la planta de cogeneración nuclear más nueva del mundo. Se trata de otro proyecto de modificación retroactiva, esta vez para acoplar una unidad de MED a la existente central nuclear de Karachi, una planta CANDU-HWR de 125 MW(e). La planta de desalación finalizada produce 1 600 m³ diarios a partir de agua de mar. En ese mismo emplazamiento se había estado explotando una planta de ósmosis inversa de 454 m³ diarios para el suministro interno de agua.

175. Todos los reactores de alta temperatura son aptos para la cogeneración. Como se observa en el cuadro B-3, los conceptos de reactor refrigerado por gas, como el reactor modular de lecho de bolas (PBMR), el reactor modular de bloque prismático (PMR) y el reactor rápido refrigerado por gas (GFR), pueden proporcionar calor destinado a procesos industriales y a la producción de hidrógeno. A fin de sacarles provecho, la UE ha puesto en marcha la Iniciativa industrial de cogeneración nuclear (NC2I). Asimismo, el sistema del VHTR se considera el mejor candidato para la producción de hidrógeno a gran escala. La cogeneración de calor y electricidad hace del VHTR una atractiva fuente de calor para grandes

complejos industriales. Se podría instalar el VHTR en refinerías e industrias petroquímicas para sustituir otras fuentes en la generación de grandes cantidades de calor industrial a distintas temperaturas, comprendida la generación de hidrógeno para mejorar el petróleo crudo pesado y ácido.

Cuadro B-3. Potencial de las aplicaciones de productos energéticos de los sistemas de reactores refrigerados por gas de la Generación IV más prometedores

Reactor	PBMR	PMR	GFR	VHTR
Potencia térmica (MW(t))	250	600	600	600
Potencia eléctrica (MW(e))	110	286	288	300-360
Temperatura de salida (°C)	850	850	850	950-1 300
Presión del circuito primario (MPa)	7,75	7,07	7,0	6,8-8,0
Producción de hidrógeno	Sí	Sí	Sí	Sí
Desalación de agua	Sí	Sí	Sí	Sí
Calor industrial a gran temperatura (Refinerías de petróleo, desulfuración de petróleo pesado)	Sí	Sí	Sí	Sí
Calefacción urbana	Sí	Sí	Sí	Sí

176. Las plantas de cogeneración ofrecerán más ventajas si se construyen junto a otras plantas porque pueden compartir muchos servicios e infraestructuras convencionales, lo que supondrá una reducción tanto de los costos como del uso de la tierra. Por lo general, se presta más atención a los aspectos de seguridad que se logran al acoplar la central nuclear a la unidad de cogeneración con un bucle intermedio.

B.2. Fusión nuclear

177. El desarrollo de la ciencia de la fusión nuclear, la ingeniería y la tecnología hasta el punto en que se pueda suministrar a la red energía de fusión es uno de los desafíos más interesantes del siglo XXI y posiblemente uno de los más gratificantes.

178. Tras el establecimiento del proyecto relativo al Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) en 2006, varias naciones del mundo se han sumado a los esfuerzos encaminados a demostrar la viabilidad científica y tecnológica y las características de seguridad de la energía de fusión cuando se generan más de 500 MW para su utilización con fines pacíficos.

179. El 10 de noviembre de 2012 el Gobierno de Francia publicó el “Decreto 2012–1248”, por el que se autoriza la creación de la instalación nuclear del ITER, marcando así un hito sin precedentes para el ITER y el programa mundial de desarrollo de la fusión. Los trabajos de construcción del emplazamiento del ITER están en curso y el nuevo edificio de la sede se encuentra en uso desde octubre de 2012. Asimismo, se ha terminado la carretera de 104 km construida especialmente para el transporte de grandes componentes desde el puerto de Marsella hasta el emplazamiento del ITER, que se inauguró con éxito a título de prueba en septiembre de 2013 con un convoy consistente en un remolque de 800 toneladas, reproduciéndose así las dimensiones de las cargas de componentes más grandes y pesadas del ITER (véase la figura B-4). Este antecedente prepara el terreno para la entrega de los componentes reales del ITER a partir del verano de 2014.



Fig. B-4. El emplazamiento del ITER en septiembre de 2013 (a la izquierda). El remolque de 800 toneladas con vehículo a control remoto, utilizado para imitar el peso y las dimensiones de las cargas más grandes del ITER (10 m de alto, 33 m de largo, 9 m de ancho), se desplazó, a título de prueba, por la carretera especial de 104 km (a la derecha), a una velocidad media de 5 km/hora durante cuatro noches consecutivas. (Fotografías: ITER).

180. A 21 de noviembre de 2013, es decir, exactamente siete años después de la firma del acuerdo ITER en París, se habían firmado todos los contratos importantes relacionados con las obras civiles en el emplazamiento, alcanzándose así un hito fundamental del proyecto, y la fabricación de los componentes clave avanzaba de manera sostenida en las respectivas industrias. Se trata de componentes clave tales como las bobinas superconductoras, la cámara de vacío y el crisotato. Aproximadamente 500 trabajadores de la construcción trabajaron en el emplazamiento del ITER en 2013. Esta cifra aumentará a 3 000 en el punto máximo de las actividades de construcción en 2014–2015. El calendario general actual incluye la finalización de los trabajos relacionados con la maquinaria y el primer funcionamiento con plasma en noviembre de 2020. En noviembre de 2013 se tomó una decisión importante, que redundará en economías para el proyecto, a saber, que las operaciones se iniciarán utilizando un desviador de tungsteno (la zona de descarga de energía del plasma en un dispositivo de fusión por confinamiento magnético), en lugar del desviador de fibra de carbono que se habría reemplazado durante la segunda fase de las operaciones por el desviador de tungsteno.

181. Con el avance de la construcción del ITER, el programa mundial de fusión magnética se está convirtiendo en un programa cada vez más centrado en la producción de energía de fusión a escala industrial. Muchos países están elaborando de manera independiente planes de programas y están iniciando nuevas actividades de I+D destinadas a demostrar que la energía de fusión está lista para ser comercializada. Colectivamente, esos planes y actividades constituyen un programa de “central de demostración de la fusión” (DEMO), pese a que no existe una visión única o coordinada de la hoja de ruta para demostrar la generación de electricidad a partir de la fusión.

182. Interesa a todos los Estados, independientemente de que tengan diferentes énfasis y prioridades, resolver las cuestiones científicas y técnicas y los requisitos de la instalación asociados a la DEMO. El organismo estableció en 2012 una serie de talleres anuales del programa DEMO para facilitar la cooperación internacional en la definición y coordinación de las actividades. Inmediatamente después de la 24ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión, celebrada en San Diego (Estados Unidos de América), en octubre de 2012 se realizó el primer taller del programa DEMO del Organismo en la Universidad de California, en Los Angeles. Durante los debates habidos en el taller se subrayó que la hoja de ruta del ITER debe incluir tanto las instalaciones nucleares de fusión integradas como las instalaciones de irradiación de materiales de fusión. Ya se ha iniciado la labor de planificación en relación con algunas de estas instalaciones importantes. Tanto la hoja de ruta como las modalidades óptimas de colaboración estarán definidas por las iniciativas que adopten las partes con miras a la construcción y explotación de estas instalaciones en gran escala.

183. Cabe citar, como ejemplo, la hoja de ruta oficial para la realización de la energía de fusión recientemente aprobada en el marco del Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión¹⁷. En esa hoja de ruta la búsqueda de la energía de fusión se desglosa en ocho misiones. En el marco de una misión de ellas se examina el estado actual de las investigaciones, se determinan las cuestiones pendientes, se propone un programa de investigación y desarrollo y se estiman los recursos requeridos. Además, en la hoja de ruta se señala la necesidad de una mayor participación de la industria y de explorar toda oportunidad de colaboración fuera de Europa. Según se indica en ella, está previsto que a principios del decenio de 2040 se ponga en funcionamiento una central de demostración de la fusión que tendrá una capacidad de producción neta de electricidad para la red de varios cientos de megavatios y que constituirá un paso hacia la construcción de una central comercial de energía de fusión en Europa. La transición del programa europeo de fusión de una empresa basada en la ciencia a una basada en la industria y la tecnología se ve corroborada por la sustitución, a partir de enero de 2014, del Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión por el nuevo consorcio EURO fusion. Esta nueva organización tendrá un enfoque orientado a los proyectos y fomentará las misiones de la hoja de ruta, las investigaciones de los procesos básicos del plasma y la capacitación de una nueva generación de científicos del ITER. En otros países partes en el ITER están surgiendo gradualmente iniciativas similares a la de la hoja de ruta.

184. El segundo taller del programa DEMO tuvo lugar en la Sede del Organismo en diciembre de 2013; los debates se centraron en tres temas principales: códigos de diseño técnico para la física de la fusión, descarga de energía del plasma y control de impurezas, y escenarios y control del plasma.

185. La Instalación nacional de ignición en el Lawrence Livermore National Laboratory de los Estados Unidos de América utiliza un sistema de confinamiento inercial dotado de láseres de alta potencia para generar reacciones de fusión con el objeto de obtener una gran ganancia de energía a partir del calentamiento y la compresión de una pastilla criogénica de deuterio-tritio. En 2013 la Instalación de ignición cumplió muchos de los requisitos que se consideran necesarios para lograr la ignición, que es el punto en que la reacción libera la misma energía que se introduce en el sistema en su conjunto: suficiente intensidad de rayos X en el hohlraum, transmisión precisa de la energía al blanco y niveles deseados de compresión. Ahora bien, todavía queda por superar al menos un obstáculo importante, a saber, la fragmentación prematura de la cápsula en la que se encuentra la mezcla de combustible.

186. La 25ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión, el evento más importante en esta esfera, tendrá lugar en octubre de 2014 en San Petersburgo (Federación de Rusia).

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

C.1. Aceleradores

187. El ámbito del desarrollo de aceleradores está evolucionando rápidamente, lo que permite disponer de aplicaciones innovadoras con una incidencia social. Hasta la fecha, el desarrollo de las tecnologías de aceleradores se basaba en dos parámetros principales al definir la forma y longitud de un acelerador: el campo magnético máximo que se puede aplicar a un haz de partículas aceleradas y el gradiente de aceleración máximo que la máquina puede alcanzar. En la actualidad, el valor superior de

¹⁷ <http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>.

campo magnético que se puede alcanzar es de 20 tesla aproximadamente, siempre que se utilicen superconductores. Se prevé lograr ciertos progresos con la llegada de nuevos superconductores de alta temperatura que pueden posibilitar campos de hasta 30 tesla. Este incremento de la fuerza del campo magnético es sin duda un gran paso adelante; no obstante, no se puede considerar un logro en la esfera de la I+D de los aceleradores. Sin embargo, han sido un gran avance los enormes gradientes de aceleración alcanzados recientemente: en lugar de los 20-50 MeV/m que un acelerador convencional puede alcanzar, un acelerador de campo de estela de plasma (PWFA) puede acelerar un haz de electrones hasta 200 GeV en la misma distancia. En un PWFA, un haz de electrones de alta intensidad y baja energía (o un pulso de láser intenso y breve) excita el plasma, que se forma ionizando un gas con un láser o mediante la ionización de un campo por el propio paquete de electrones de entrada. La figura C-1 ilustra el principio de funcionamiento:

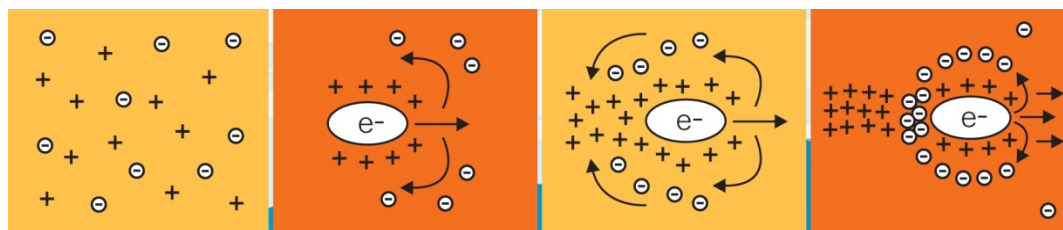


Fig. C-1. De izquierda a derecha: a) Iones positivos y electrones libres forman un plasma; b) un paquete de electrones se introduce en el plasma y repele todos los electrones libres. Los iones positivos se ven atraídos alrededor del paquete de electrones; c) los electrones libres desplazados se ven atraídos por los iones positivos que el paquete ha dejado atrás; d) los electrones libres, en su nueva posición detrás del paquete, aceleran el paquete de electrones.

188. El potencial de los aceleradores basados en plasma para suministrar potentes haces de electrones en una fracción muy reducida del espacio que precisan los aceleradores convencionales es enorme. La posible reducción de la longitud, con la correspondiente reducción del costo, podría dar lugar a la creación de aceleradores de plasma por láser “de mesa” en el futuro. Como demostró el Lawrence Berkeley National Laboratory, un pulso de láser a través de un tubo capilar de dimensiones inferiores a las de una palma lleno de plasma de hidrógeno crea un campo de estela capaz de acelerar un haz de electrones a 1 000 millones de eV en solo 3,3 cm.

189. La luz de sincrotrón se produce a partir de electrones que circulan en un círculo a casi la velocidad de la luz. Los electrones son desviados por el campo magnético de los imanes de curvatura distribuidos a lo largo de la circunferencia. La luz de sincrotrón se compone de intensa luz infrarroja, ultravioleta y de rayos X. Los haces de luz se emiten tangencialmente a la trayectoria de los electrones siguiendo una línea recta hacia las líneas del haz, es decir, instrumentos compuestos de una serie de cabinas. La primera contiene instrumentos como hendiduras, filtros, espejos y monocromadores.

190. La radiación sincrotrónica permite estudiar los detalles estructurales de la materia, en particular en una escala comparable a la de la colocación de átomos individuales. Los métodos analíticos basados en la luz de sincrotrón son capaces de suministrar información sobre la estructura espacial de los materiales, la estructura química y electrónica, la microestructura y las propiedades de superficies, interfaces, capas delgadas y varias capas. La radiación sincrotrónica se puede utilizar para crear imágenes de sección eficaz de la materia a fin de analizar su comportamiento en intervalos de nanosegundos. Por lo tanto, es un instrumento indispensable para las investigaciones aplicadas en una amplia variedad de esferas como el desarrollo de nuevos materiales importantes en el campo de la nanotecnología, la electrónica y las comunicaciones, la generación y el almacenamiento de energía, la medicina y la atención de salud, el transporte y el medio ambiente.

191. También se utilizan aceleradores para producir radioisótopos, como flúor 18, cobre 64 y carbono 11. El OIEA puso en marcha en 2011 un proyecto coordinado de investigación que se centra en la producción directa del importante isótopo médico molibdeno 99 (Mo 99) y su producto de desintegración, el tecnecio 99m (Tc 99m), en ciclotrones. A diferencia del proceso de fisión habitual para producir Mo 99 (Mo 99) en un reactor que usa blancos de uranio, estas tecnologías utilizan blancos de Mo 100. Se puede usar un acelerador lineal para producir Mo 99 mediante la transmutación de Mo 100 enriquecido, al tiempo que se pueden emplear ciclotrones para producir Tc 99m directamente irradiando Mo 100.

192. La dirección del programa del Canadá en esta esfera corre a cargo de la Universidad de Alberta (ciclotrón), TRIUMF (ciclotrón) y la empresa de producción de isótopos Prairie (acelerador lineal). Se están llevando a cabo actividades para demostrar que se pueden producir cantidades comerciales de isótopos y TRIUMF ha anunciado recientemente la existencia de una capacidad de producción suficiente para abastecer a entre 10 y 20 departamentos de medicina nuclear de hospitales. Estas dos tecnologías presentan la importante ventaja ambiental y económica de generar pocos desechos y los proyectos han demostrado ser eficientes en el 90 % de los casos con respecto al reciclaje de Mo 100. Se está trabajando para cumplir los requisitos reglamentarios y abordar los desafíos técnicos y comerciales restantes.

193. Por medio de programas y actividades específicos, el Laboratorio de Espectrometría y Aplicaciones Nucleares (NSAL) del Organismo da apoyo al desarrollo de técnicas de espectrometría de rayos X basadas en laboratorios y aceleradores para aplicaciones interdisciplinarias e investigaciones básicas. Sobre la base de un proyecto de investigación y desarrollo iniciado en 2011 por el NSAL, el Organismo y la instalación Elettra de Italia firmaron un contrato en 2013 para construir y explotar una nueva línea de haces de fluorescencia de rayos X. La nueva estación experimental suministrada por el Organismo fue instalada en la línea de haces en el último trimestre de 2013. Esto posibilitará la capacitación práctica de los Estados Miembros en técnicas avanzadas de espectrometría de rayos X como la fluorescencia de rayos X (XRF), la fluorescencia total de rayos X de reflexión, y la fluorescencia de rayos X de incidencia rasante/fluorescencia de rayos X de salida rasante, en combinación con la reflexión de rayos X y la espectroscopia de absorción de rayos X, y en el fomento de actividades de investigación y programas académicos pertinentes.

194. Con ese fin, en 2013 se inició un proyecto coordinado de investigación destinado a aumentar la calidad y competitividad de las investigaciones de los Estados Miembros sobre los métodos de espectrometría de rayos X basados en la radiación sincrotrónica dando apoyo a la capacitación práctica avanzada, orientando actividades experimentales y realizando actividades de investigación en la estación terminal de la cámara de ultravacío (UHVC) (figura C-2) de la línea de haces de XRF de Elettra.

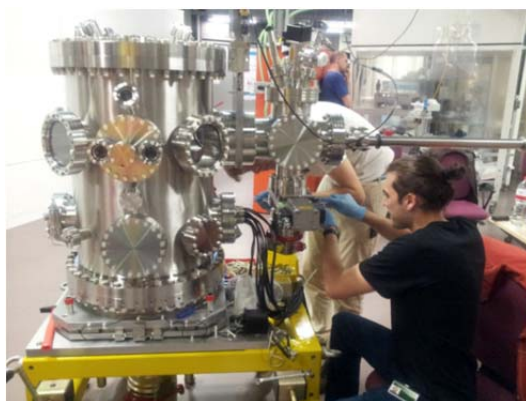


Fig. C-2: Montaje de la estación terminal de la UHVC.

195. Al caracterizar objetos históricos, los daños por radiación son una preocupación habitual de científicos, comisarios, conservadores y arqueólogos. Debido a la alta dosis depositada, existe el riesgo de degradación del material que se esté estudiando. En ocasiones los daños pueden ser apreciados a simple vista, como la formación de centros de color en el vidrio o el oscurecimiento de los compuestos orgánicos. Aun sin consecuencias visuales directas en la muestra o el objeto, la pérdida de información que podría darse o peor aún, la obtención de información sesgada o que pudiera inducir a error de una zona dañada por la radiación es un importante riesgo analítico.

196. Hasta la fecha se han realizado algunos estudios sistemáticos de la decoloración debida al análisis de papel con haces de iones, por ejemplo, un estudio en el que se informaba de la aparición de marcas en dos tipos de papel de hilos (con o sin capa de fondo) envejecidos artificialmente, derivadas de la exposición a protones del orden de MeV en diversas condiciones.¹⁸ La figura C-3, tomada de este estudio, muestra un conjunto típico de observaciones. Los autores han llegado a la conclusión de que, siempre que las condiciones de exposición se mantengan por debajo de determinados criterios, no se observan marcas visibles, incluso tras un proceso de ciclos de humedad y temperatura destinados a simular un envejecimiento de unos 100 años.

197. Los daños por radiación de materiales que son patrimonio cultural revisten gran importancia en relación con el envejecimiento y la degradación. No obstante, se da un proceso similar cuando muestras de patrimonio cultural son irradiadas para su caracterización y conservación. El Organismo está abordando estas cuestiones mediante reuniones técnicas, estudios interlaboratorios y la elaboración de mejores prácticas y protocolos. El objetivo es proponer una nueva definición de cómo caracterizar los efectos inducidos por la radiación en los materiales que son patrimonio cultural. Esa definición se basaría en elementos distintos de la inspección visual inmediata, determinaría actividades pertinentes de ámbitos conexos que pudieran facilitar información valiosa sobre los mecanismos de deterioro de los diversos y en ocasiones singulares materiales que son patrimonio cultural, analizaría las estrategias de monitorización de los daños por radiación, y propondría estrategias de mitigación.

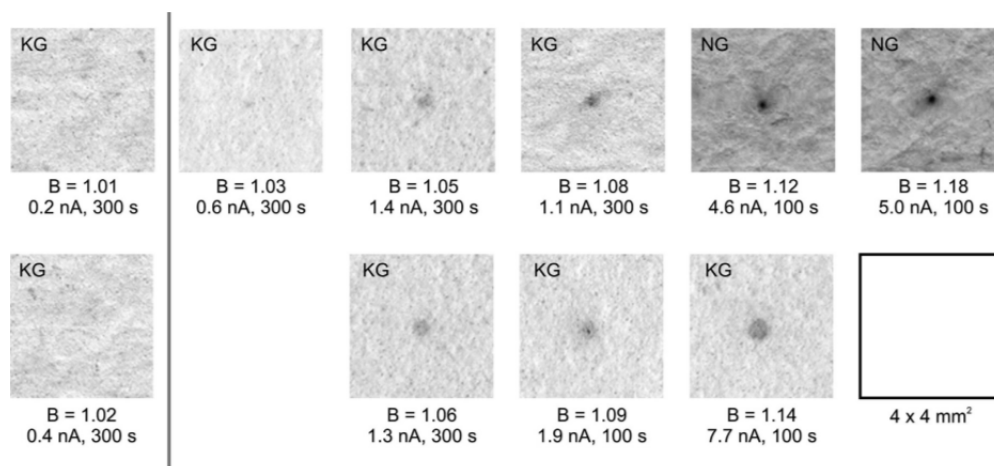


Fig. C-3: Imágenes aumentadas de zonas del papel irradiadas tras el envejecimiento acelerado, ordenadas por exposición creciente a los protones. NG es papel de hilos sin capa de fondo; KG es papel de hilos con capa de fondo de blanco de hueso. El valor B (básicamente la razón entre los valores de la escala de grises de una mancha y su entorno) indica la cantidad de decoloración inducida por el haz. En las figuras de la izquierda con un valor B hasta 1.02, separadas de las demás por una línea vertical, no hay efectos visibles. (Fuente: Milota et al. 2008).

¹⁸ MILOTA P. et al., "PIXE measurements of Renaissance silverpoint drawings at VERA", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 266 (2008), 2279–2285.

198. El Organismo prevé poner en funcionamiento un nuevo Portal de Conocimientos sobre Aceleradores destinado a los usuarios de aceleradores, investigadores y suministradores de servicios analíticos de todo el mundo. Ese portal ofrece no solo una base de datos sobre los aceleradores de partículas del orden de megavoltios del mundo, sino que también cuenta con diversas funciones de creación de redes y de contacto para acercar a los integrantes de la comunidad de aceleradores de haces de iones, y facilita asimismo información a los usuarios de aceleradores y a los encargados de elaborar políticas.

C.2. Reactores de investigación

199. Los reactores de investigación se usan principalmente para proporcionar neutrones para actividades de investigación y diversas aplicaciones, entre ellas la enseñanza y capacitación, como se muestra en el cuadro C-1. Las potencias nominales de los reactores de investigación se designan en megavatios y la potencia puede oscilar entre cero (p. ej., conjuntos críticos o subcríticos) y 200 MW(t), en comparación con 3 000 MW(t) —es decir, 1 000 MW(e)— en el caso de un reactor de gran potencia típico.

200. Al 31 de diciembre de 2013, había en el mundo 245 reactores de investigación en funcionamiento¹⁹. Además, había 20 reactores de investigación en régimen de parada temporal y 142 en régimen de parada a largo plazo. De los reactores en funcionamiento, 57 son de gran capacidad, funcionan a niveles de potencia de más de 5 MW y ofrecen flujos neutrónicos de intensidad más alta. Se han clausurado 338 reactores de investigación adicionales. La mayoría de los reactores de investigación que están en funcionamiento siguen estando muy infrautilizados, son muy antiguos y, por tanto, requieren constantemente gestión del envejecimiento, modernización y renovación.

Cuadro C-1. Aplicaciones habituales de los reactores de investigación en el mundo²⁰.

Tipo de aplicación	Número de reactores de investigación ^a	Estados Miembros que acogen las instalaciones utilizadas
Enseñanza/capacitación	174	54
Análisis por activación neutrónica	128	54
Producción de radioisótopos	96	43
Irradiación de materiales/combustible ^c	80	29
Radiografía neutrónica	72	41
Dispersión de neutrones	50	33
Transmutación (dopado con silicio)	30	19
Geocronología	26	22
Transmutación (piedras semipreciosas)	21	12
Terapia por captura neutrónica en boro, principalmente I+D	18	12
Otras ^b	137	35

^a De un total de 280 reactores de investigación examinados (245 en funcionamiento, 20 en régimen de parada temporal, 5 en construcción y 10 previstos; 31 de diciembre de 2013).

^b Entre otras aplicaciones cabe citar: calibración y ensayo de instrumentación y dosimetría, experimentos de blindaje, experimentos de física de reactores, mediciones de datos nucleares, y visitas y seminarios de relaciones públicas.

^c El Organismo está elaborando un catálogo exhaustivo titulado “Capabilities and Capacities of Research Reactors towards the Deployment of Innovative Nuclear Energy Systems and Technologies”.

¹⁹ Fuente: Base de datos de reactores de investigación del OIEA (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>).

²⁰ Fuente: Base de datos de reactores de investigación del OIEA (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>).

201. En los últimos años, el interés de los Estados Miembros en desarrollar programas de reactores de investigación ha experimentado un constante aumento. Varios Estados Miembros tienen nuevos proyectos en distintas fases y algunos desean que su primer reactor de investigación sea el inicio de la infraestructura de ciencia y tecnología nucleares del país. Hay nuevos reactores de investigación en construcción en Francia, Jordania (figura C-4) y la Federación de Rusia. Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para construir nuevos reactores de investigación: Arabia Saudita, Argentina, Bélgica, el Brasil, la Federación de Rusia, la India, los Países Bajos, la República de Corea y Sudáfrica.



Fig. C-4. Izquierda: El conjunto subcrítico de Jordania de potencia cero obtuvo una licencia de explotación en junio de 2013 (Fotografía: Universidad de Ciencia y Tecnología de Jordania). Derecha: La construcción del reactor de investigación y capacitación de Jordania de 5 MW se había completado en un 49 % en octubre de 2013 (Fotografía: Comisión de Energía Atómica de Jordania).

202. Otros Estados Miembros, como por ejemplo Bangladesh, Belarús, Kuwait, el Líbano, Nigeria, la República Unida de Tanzania, el Sudán, Tailandia, Túnez, y Viet Nam estudian la posibilidad de construir nuevos reactores de investigación²¹.

203. Dado que los reactores más antiguos van siendo clausurados y sustituidos por un número menor de reactores multipropósito, se prevé que el número de reactores de investigación e instalaciones críticas operacionales siga disminuyendo. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar un acceso amplio a esas instalaciones y su uso eficiente. En 2013, las redes o coaliciones regionales de reactores de investigación, con el apoyo del Organismo²², ayudaron a potenciar la cooperación internacional y a ampliar la base de interesados directos de los reactores de investigación.

204. Durante 2013, la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM) puesta en marcha por los Estados Unidos siguió llevando a cabo su misión de reducir al mínimo la presencia de uranio muy enriquecido (UME) en aplicaciones nucleares civiles en todo el mundo. En 2009, el alcance de la IRAM se amplió de 129 a aproximadamente 200 reactores de investigación que funcionaban con combustible de UME y, a finales de 2013, 88 de ellos habían sido convertidos para usar combustible de UPE o sometidos a régimen de parada con anterioridad a la conversión.

205. Un buen ejemplo reciente de apoyo y cooperación internacional versátil en relación con la reducción al mínimo del UME es la elaboración de un plan de retirada del combustible de UME y clausura para el reactor de investigación FOTON de Tashkent (Uzbekistán). A finales de 2013 el

²¹ La reciente publicación del Organismo *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.1) está concebida para ayudar a los Estados Miembros en esta esfera.

²² El Organismo ha reunido a varias coaliciones distintas de reactores de investigación de África Central, Asia Central, el Báltico, el Caribe (que incluye la participación de América Latina), Europa Oriental y el Mediterráneo.

Gobierno de Uzbekistán estaba trabajando para financiar la ejecución de la clausura del emplazamiento del reactor.

206. Además, en la República Checa el reactor de investigación LVR15 se convirtió íntegramente para utilizar combustible de UPE y los últimos 70 kg de combustible de UME gastado se devolvieron a la Federación de Rusia en abril de 2013. En Viet Nam, después de convertir el combustible de UME en combustible de UPE en el reactor de investigación TRIGA de Dalat, el inventario final de casi 12 kg de combustible de UME gastado se devolvió a la Federación de Rusia en julio de 2013. En Hungría, se finalizó la conversión del núcleo del reactor de investigación de Budapest de 10 MW en enero de 2013 y el último lote de más de 49 kg de UME se envió a la Federación de Rusia durante octubre y noviembre de 2013 (figura C-5). Tras la conclusión de estos proyectos, en esos tres Estados Miembros dejó de haber combustible de UME.²³



Fig. C-5. Izquierda: Ajuste de los pernos de embalajes especiales para el transporte de combustible de UME gastado desde el Instituto de Investigaciones Nucleares de Dalat (Viet Nam) hasta la Federación de Rusia. Derecha: Colocación de un sobreembalaje protector en un cofre de transporte que contiene combustible de UME gastado en el reactor de investigación de Budapest (Hungría). El sobreembalaje está diseñado para posibilitar el transporte aéreo.

207. La conversión de un reactor para que utilice UPE y la repatriación del combustible de UME suele ir acompañada de importantes mejoras de infraestructura. Por ejemplo, la Iniciativa sobre los usos pacíficos del Organismo está financiando un programa de modernización completo del reactor de investigación TRIGA Mark III de México. En Ucrania, en el Instituto de Física y Tecnología de Jarkov, se está construyendo, con apoyo financiero y técnico del Departamento de Energía de los Estados Unidos, una instalación subcrítica accionada por acelerador y alimentada con combustible de UPE, tras la repatriación de todo el UME a la Federación de Rusia.

208. China prosiguió sus actividades de conversión de sus reactores miniatura fuente de neutrones para que utilicen UPE en lugar de UME, y prevé colaborar con los Estados Miembros que han adquirido reactores de ese tipo para que procedan a su conversión y repatrien el combustible de UME.

209. Tras la disminución de las dificultades de suministro de Mo 99 durante 2012, se plantearon nuevamente desafíos operacionales en instalaciones de procesamiento y reactores de investigación antiguos en 2013. Debido a los cambios de la gestión de la demanda y a cierta diversificación del

²³ En total, se transfirieron a Rusia más de 2 000 kilogramos de UME suministrados por dicho país en 56 operaciones de expedición desde que se puso en marcha una iniciativa conjunta del Organismo, los Estados Unidos y la Federación de Rusia en 2002.

suministro, esas dificultades no provocaron una crisis de la misma magnitud que la que se produjo entre 2007 y 2010. Prosiguió la conversión de los procesos de producción de isótopos médicos de UME a UPE. Australia y Sudáfrica continuaron siendo los principales suministradores de Mo 99 obtenido a partir de fuentes distintas del UME, y Sudáfrica prosiguió la conversión de sus procesos para utilizar exclusivamente UPE. Otros dos importantes productores de isótopos médicos, esto es, Bélgica y los Países Bajos, siguieron adelante con sus planes de conversión de sus procesos de producción a escala comercial de UME a UPE.

210. 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 antes de 2013 se registraron avances sustanciales en este campo, es preciso realizar más esfuerzos y ensayos, particularmente en relación con los programas de examen de irradiación y postirradiación, así como en la esfera de las técnicas de fabricación, para lograr la disponibilidad comercial oportuna de combustibles de UPE cualificados.

211. Tras la conversión de los reactores TRIGA pertinentes, ha disminuido la demanda global de combustible para TRIGA. Desde 2010 no se han suministrado nuevos elementos combustibles, lo que plantea dificultades para el funcionamiento actual de varios reactores TRIGA en todo el mundo. Debido a esas amenazas comunes, en junio de 2012 los usuarios de ese tipo de reactores crearon la Red mundial de reactores de investigación TRIGA (GTRRN). En noviembre de 2013 se dio carácter oficial a la GTRRN en Viena estableciendo su Comité Directivo. La GTRRN abordará los desafíos que afectan a las 38 instalaciones de TRIGA en funcionamiento en todo el mundo, principalmente encontrando soluciones alternativas a cuestiones como el suministro de combustible no irradiado, la ampliación del programa de los Estados Unidos de repatriación de combustible nuclear gastado, la mejora de la utilización, la gestión del envejecimiento, la explotación y el mantenimiento.

212. En 2013 se prosiguieron las actividades destinadas a promover y mejorar la utilización de los reactores de investigación con fines de enseñanza y capacitación. Los proyectos internacionales consistieron, entre otras cosas, en encontrar maneras de aumentar el número, los tipos y la calidad de los cursos de capacitación, en brindar acceso a jóvenes profesionales de países en desarrollo de todo el mundo, y en utilizar los reactores de investigación en la educación básica y especializada relacionada con la ciencia y tecnología nuclear.

D. Técnicas nucleares para aumentar la producción pecuaria y reducir al mismo tiempo los gases de efecto invernadero

213. La producción de una cantidad suficiente de alimentos para satisfacer la demanda de consumo de la creciente población humana ha sido un desafío global. Este desafío se ve agravado por el impacto ambiental de la adquisición de alimentos, que requiere un gran consumo energético y contribuye así a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El sector agrícola, incluido el ganado, representa aproximadamente el 22 % de las emisiones globales totales²⁴. Las buenas prácticas en la producción ganadera pueden incrementar tanto la cantidad como la calidad de los animales y sus productos, y reducir las emisiones de GEI.

²⁴ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “Tackling climate change through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities”, (FAO, Roma (2013)).

214. La presente sección se centra en las tecnologías nucleares y de la esfera nuclear innovadoras que se pueden desarrollar y aplicar con el fin de mejorar la nutrición, la reproducción y la cría, y la salud de los animales y contribuir así a la seguridad alimentaria sostenible al mismo tiempo que se mitiga el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de GEI. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), considera que esto es un ejemplo de agricultura climáticamente inteligente²⁵.

D.1. Gestión del ganado inocua para el medio ambiente

215. A fin de limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C²⁰, nivel al cual según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático las repercusiones del cambio climático podrían ser irreversibles, la industria ganadera debe abordar el desafío doble de aumentar la producción en aras de la seguridad alimentaria mundial y reducir al mismo tiempo las emisiones totales de GEI para proteger el medio ambiente. Por lo tanto, es preciso realizar investigaciones encaminadas a desarrollar las tecnologías y plataformas más modernas que permitan alcanzar simultáneamente esos dos objetivos.

D.1.1. Satisfacer la creciente demanda de alimentos de origen animal

216. Para 2050 se prevé un incremento del 70 % en el consumo de alimentos de origen animal debido al aumento de la población, de los ingresos y a la urbanización. Por consiguiente, serán necesarios múltiples incrementos de la producción ganadera. Según las estimaciones actuales, el ganado aporta aproximadamente el 14,5 % (7,1 gigatoneladas de equivalente en CO₂/año) de las emisiones totales de GEI antropógenas²¹. La producción y el procesamiento de piensos y su fermentación en el rumen del ganado son las dos principales fuentes de emisiones de GEI en el ganado, y representan el 45 % y el 39 %, respectivamente, de las emisiones relacionadas con él. La mayor parte de los GEI del ganado proceden del ganado bovino (65 %), y el 31 % de los GEI emitidos por este tipo de ganado es metano entérico. Esto se considera una pérdida de nutrientes y, por lo tanto, la mejora de la eficiencia en la digestión de los piensos reducirá las pérdidas por metano entérico.

217. Otras fuentes de emisiones de GEI relacionadas con el ganado son el almacenamiento y procesamiento de estiércol (10 %), la ampliación de los pastos y los cultivos forrajeros a zonas previamente arboladas (9 %), y el consumo de combustibles fósiles en distintas categorías de la cadena de suministro del sector (20 %). Es posible alcanzar metas a corto y mediano plazo de mitigación de los GEI e incrementar la producción ganadera mediante la adopción de buenas prácticas agrícolas a fin de mejorar la eficiencia en la utilización de piensos y la productividad individual y del rebaño. Para las soluciones a largo plazo, es preciso realizar investigaciones innovadoras destinadas a promover el desarrollo de animales más robustos y productivos adaptados a climas duros, resistentes a las enfermedades y capaces de utilizar forrajes de baja calidad y residuos de los cultivos (figura D-1). También es necesario realizar investigaciones destinadas a mejorar la digestibilidad de los residuos de los cultivos sin comprometer el rendimiento de los cereales y a desarrollar pastos que crezcan en climas duros y generen al mismo tiempo una mayor biomasa más digestible para el consumo animal.

²⁵ <http://www.fao.org/climatechange/climatesmart/es/>.



Fig. D-1. El ganado Kuri autóctono en del Chad produce mucha leche y está adaptado a duras condiciones ambientales.

D.1.2. Buenas prácticas para reducir las emisiones de GEI

218. Según la FAO, las emisiones de GEI procedentes del ganado se pueden reducir un 30 % si todos los productores de una comunidad adoptan prácticas de agricultura climáticamente inteligente, que ya ha adoptado el 10 % de los principales productores²⁶. Las investigaciones deberían centrarse en la reducción de las emisiones de GEI mediante la mejora de las prácticas, no mediante la modificación de los sistemas de producción, que son distintos en función de las especies de ganado y las regiones. Las intervenciones relativas a la mitigación de los GEI no deben suponer un aumento del consumo energético en otros sectores. Por ejemplo, gracias a la intensificación de los sistemas de producción y la compensación de las raciones de forraje con cereales, la industria ganadera de los Estados Unidos y de Europa occidental produce entre 9 y 10 millones de toneladas de proteína y emite unas 0,6 gigatoneladas de equivalente en CO₂. En cambio, América Latina y el Caribe producen una cantidad igual de proteína alimentando al ganado con pastos y forrajes de baja calidad y con poco complemento de cereales, y emiten 1,3 gigatoneladas de equivalente en CO₂.

219. No obstante, es preciso realizar investigaciones para determinar si la intensificación de la producción ganadera lograda al añadir cereales al pienso supondrá un aumento de las emisiones de GEI debido al mayor consumo de combustibles fósiles y la producción de cereales. Podrían surgir otras preocupaciones ambientales por el uso excesivo de agua relacionado con una producción ganadera más intensiva. Esto demuestra que se precisan investigaciones exhaustivas a fin de concebir enfoques holísticos para aumentar la productividad ganadera al mismo tiempo que se mantienen las emisiones de GEI en el valor más bajo posible.

D.1.3. Soluciones beneficiosas tanto para el aumento de la producción como para intervenciones de mitigación

220. En la gestión de cualquier sistema de producción, la rentabilidad suele ser el factor decisivo y es probable que sea determinante en la adopción de cualquier práctica de mitigación de los GEI. Por consiguiente, esas tecnologías deberán mejorar la eficiencia de la producción ganadera tanto a nivel de cada animal como del rebaño. De hecho, la mayoría de las intervenciones de mitigación son beneficiosas tanto para el medio ambiente como para los aspectos económicos de las explotaciones agrícolas. Por ejemplo, los piensos de mayor calidad y la compensación de los piensos no solo reducen la emisiones de GEI entéricas y del estiércol, sino que contribuyen a aumentar la productividad y los ingresos²⁷. La mejora de las prácticas de reproducción y de salud pecuaria contribuyen a reducir los

²⁶ Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). "Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma.

²⁷ HRISTOV et al., "Special Topics — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options", Journal of Animal Science, 91 (2013), 5045-5069.

gastos generales de reproducción (animales destinados a la reproducción que aún no producen aunque consumen recursos) y las emisiones conexas.

221. Se ha descubierto que en el caso de los pequeños agricultores que practican la ganadería con un doble objetivo, en la que el ganado produce carne y leche, las emisiones de GEI son cuatro veces menores que las que se dan en el caso de las explotaciones agrícolas especializadas que producen por separado carne de vacuno y productos lácteos²⁸. La caracterización genética y el mejoramiento asistido por marcadores, y una alimentación mejorada, pueden contribuir a mejorar la calidad de la carne y la cantidad de animales productores de leche. Por ejemplo, en un proyecto coordinado de investigación del Organismo sobre caracterización genética de pequeños rumiantes para determinar la resistencia a los parásitos gastrointestinales, se han individualizado especies de oveja y cabra más resistentes a esos parásitos en los 12 Estados Miembros participantes (figura D-2). Capacidades como la extracción de ADN, la elaboración de mapas de esquemas híbridos de radiación, la secuenciación de genomas enteros basada en iones protones, la micromatriz de polimorfismo de un solo nucleótido (SNP) y el genotipado, que se han transferido por conducto de proyectos de cooperación técnica, se pueden emplear en otras investigaciones relacionadas con el genoma, como la caracterización de especies de ganado para establecer las tasas metabólicas basales y la mejor utilización de forrajes de baja calidad y de residuos de los cultivos y de subproductos.



Fig. D-2. Las cabras autóctonas de Angola son tolerantes a las enfermedades y se alimentan de pastos de poca calidad.

D.2. Técnicas nucleares para abordar las emisiones de GEI

222. Las técnicas nucleares en las que se emplean isótopos estables así como radioisótopos y radiación son instrumentos importantes en las investigaciones sobre producción pecuaria y salud animal. La ventaja comparativa de las técnicas nucleares en la investigación y el diagnóstico pecuarios es que son más específicos y sensibles que las técnicas no nucleares²⁹. Las técnicas nucleares que se describen en los párrafos siguientes abordan las prácticas de cuantificación y mitigación de las emisiones de GEI que guardan relación con la fermentación entérica, la descomposición de estiércol, la producción de piensos y forrajes, las eficiencias en la utilización de piensos y el manejo de los pastos.

²⁸ Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. 2013. "Tackling climate change through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma.

²⁹ VILJOEN et al., "The role of nuclear technologies in the diagnosis and control of livestock diseases—a review", *Tropical Animal Health and Production*, 44 (2012), 1341-1355.

D.2.1. Mejora de la digestibilidad de la fibra de baja calidad

223. El mejoramiento de la digestibilidad de los rumiantes depende del equilibrio de la dieta, que da lugar a una mejor fermentación en el rumen por microorganismos que producen ácidos grasos volátiles (ácido acético, ácido butírico, ácido propiónico) y proporcionan así nutrientes a los rumiantes. Un resultado adicional de este proceso es el crecimiento de una masa microbiana que satisface una parte de las necesidades proteínicas de los rumiantes huéspedes. Durante el proceso, las bases púricas presentes en el ADN y ARN de los forrajes y los microorganismos se degradan en derivados de la purina como la xantina, la hipoxantina, el ácido úrico y la alantoína, que se excretan en la orina.

224. La detección de derivados de la purina en la orina es una técnica *in vivo* no invasiva para estimar la aportación de proteínas microbianas y es preferible a las técnicas convencionales, que son invasivas. Se han utilizado trazadores de carbono 14, como el ácido úrico marcado con carbono 14 y la alantoína marcada con carbono 14, para elaborar modelos de las relaciones entre la absorción de purina y la excreción de sus derivados en la orina³⁰. Para estimar las tasas de producción de ácido graso volátil se utiliza la infusión de ácido acético y propiónico marcado con carbono 14. Se puede utilizar urea con nitrógeno 15, bicarbonato amónico con nitrógeno 15 y cloruro de amonio con nitrógeno 15 para estudiar la degradación microbiana de las fibras de baja calidad, la masa microbiana, el uso de nitrógeno no proteínico, el reciclaje de urea, la síntesis de proteínas microbianas y las interconversiones de aminoácidos en el rumen.

225. La incorporación de fósforo 32, fósforo 33, nitrógeno 14 o azufre 35 en los microorganismos del rumen permite determinar la tasa de síntesis de proteínas microbianas. Minerales marcados, como fósforo 32, selenio 75, calcio 45, arsénico 76 y cobre 67, se utilizan para investigar los desequilibrios de minerales en los animales de granja. El ácido etilenodiaminotetraacético con cobalto 58, la fenantrolina con rutenio 104 y los forrajes marcados con cromo 51 se utilizan para determinar la velocidad de paso. Para estimar la producción de dióxido de carbono en el rumen se emplean técnicas de infusión de bicarbonato de sodio marcado con carbono 13/carbono 14. Estos estudios ofrecen una base para mejorar la digestibilidad, lo que a su vez aumenta los índices de conversión de piensos y la utilización de energía y reduce las emisiones de GEI por unidad de producto. Además, se puede estimar la emisión de metano por los rumiantes mediante dilución isotópica empleando metano marcado con hidrógeno 3 o con carbono 14³¹.

D.2.2. Caracterización genética de la microflora del rumen para mejorar la digestibilidad ruminal

226. Los microbios del rumen cumplen un papel fundamental en la degradación de estructuras vegetales complejas en los nutrientes necesarios para su propio crecimiento y el de los animales huéspedes. La diversidad filogenética de la comunidad microbiana presente en el rumen ha sido descrita mediante el estudio de las subunidades pequeñas del ARN ribosómico o los genes correspondientes. Tecnologías como las sondas de oligonucleótidos marcados con fósforo 32, la electroforesis en gel con gradiente desnaturante, la hibridación *in situ* con sondas fluorescentes y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) en tiempo real ayudan a caracterizar y cuantificar los microbios del rumen y su dinámica. Los sondeos con isótopos estables basados en el ADN tienen un gran potencial para relacionar la información genética microbiana con las funciones biológicas. Estudios metagenómicos en los que se emplean técnicas de secuenciación de nueva generación ayudan a dibujar un panorama completo del genoma

³⁰ MAKKAR H.P.S., "A review of the use of isotopic and nuclear techniques in animal production, *Animal Feed Science and Technology*", 140 (2008), 418–443.

³¹ Véase la nota 21.

microbiano y el contenido total de plásmidos del rumen. Ello permite identificar dominios nuevos, que son secuencias genéticas nuevas que emergen en proteínas individuales como resultado de su evolución, y sus rasgos funcionales en la digestibilidad ruminal³².

D.2.3. Cría de ganado para aumentar la productividad y mantener al mismo tiempo la adaptabilidad a las condiciones locales

227. La identificación de genes concretos y la caracterización de genomas del ganado autóctono y adaptado facilitarán la determinación de rasgos genéticos ventajosos, como los de la resistencia a las enfermedades (p. ej., parásitos gastrointestinales, tripanosomiasis) o la capacidad de desarrollarse en condiciones de estrés climático o nutricional. La cría de ganado asistida por marcadores orientada a aumentar la productividad y la adaptabilidad se apoya en las sondas de ADN marcadas con isótopos, las técnicas de hibridación por transferencia puntual y en la elaboración de mapas híbridos de radiación, junto con biotecnologías no nucleares, como la PCR y la secuenciación de nueva generación para la caracterización genética.

D.2.4. Mejora de la productividad de los rebaños y reducción de las emisiones de GEI

228. En una cabaña lechera, el aumento de la proporción de animales productores de leche da como resultado una reducción de las emisiones de GEI por unidad de leche producida. Se ha utilizado progesterona marcada con yodo 125 en radioinmunoanálisis (RIA) para determinar la progesterona en la sangre, la leche y otros fluidos corporales y excrementos³³. La progesterona es una hormona reproductiva cuya determinación ayuda a diagnosticar la preñez, los trastornos en los ciclos de celo y los trastornos reproductivos, por ejemplo, de las vacas y los búfalos. Esos diagnósticos dan lugar a un aumento de la eficiencia reproductiva, de los partos de animales y de la producción de leche por rebaño. El desarrollo del RIA también ha permitido analizar otras hormonas reproductivas como el estrógeno, la testosterona, la hormona estimulante del folículo, la hormona luteinizante, la gonadotropina coriónica equina y la gonadotropina coriónica humana.

229. Se han identificado varias moléculas cuya aparición en la sangre y otros fluidos corporales se pueden utilizar para el diagnóstico precoz de preñez, y mediante la PCR y el RIA se puede detectar la presencia de esas moléculas, como la glicoproteína asociada a la preñez, el factor precoz de preñez, el interferón tau (INF-tau) y los genes estimulados por INF-tau. El INF-tau es particularmente prometedor para el diagnóstico precoz de preñez dada su rápida aparición en la sangre materna. El diagnóstico precoz de preñez es un instrumento muy importante para gestionar la productividad del rebaño al permitir identificar los animales que no están preñados pero son aptos para la reproducción. Esto puede ser útil para reducir la proporción de animales no productivos y aumentar la productividad del rebaño.

D.2.5. Caracterización y selección de forrajes tropicales y desarrollo de la agronomía de forrajes

230. La inducción de mutaciones se ha utilizado ampliamente para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos forrajeros. Entre las mejoras cualitativas se incluyen la mayor digestibilidad (p. ej., bajo contenido de lignina) y el mayor contenido de nutrientes (p. ej., mejor composición de proteínas), que

³² FOUTS et al., “Next generation sequencing to define prokaryotic and fungal diversity in the bovine rumen”, PLoS One, 7 (2012).

³³ ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, “Radioimmunoassay and related techniques to improve artificial insemination programmes for cattle reared under tropical and sub-tropical conditions”, IAEA-TECDOC-1220, OIEA, Viena (2001).

pueden obtenerse sin sacrificar el rendimiento. El fitomejoramiento por mutaciones también ha sido eficaz en el desarrollo de cultivos de pienso que están mejor adaptados para condiciones rigurosas (tolerancia al anegamiento, la sequía, la salinidad y temperaturas extremas). Se ha mejorado por tanto el rendimiento de estos cultivos, porque pueden cultivarse en regiones marginales.

231. El sistema mixto de producción agrícola-ganadera tiene como objetivo maximizar la producción de animales y cultivos, incluidos los cereales para consumo humano, y a la vez reducir al mínimo la necesidad de recursos como fertilizantes, agua y energía. Para evaluar las mejoras se pueden utilizar isótopos estables. La contribución del ganado a la intensificación sostenible de un sistema mixto de explotación agropecuaria es importante ya que proporciona estiércol, que se emplea como fertilizante para el suelo, y tracción animal para el cultivo. En estos sistemas, el producto de un proceso se convierte en aportación para otro, y la fuga de nutrientes al medio ambiente, por ejemplo, en forma de emisiones de GEI, es mínima.

232. Cuando se cultivan juntas, las leguminosas y las no leguminosas realizan funciones complementarias que proporcionan forrajes de mejor calidad y en más cantidad. La hierba utiliza el nitrógeno fijado en el suelo por las legumbres para producir mayor biomasa de más calidad. La fijación de nitrógeno y la transferencia de nitrógeno a otros cultivos sólo puede medirse con precisión mediante la técnica de dilución de nitrógeno 15, que requiere marcar el suelo con fertilizante con nitrógeno 15 (por ejemplo, sulfato de amonio con nitrógeno 15/urea con nitrógeno 15). Además, se puede usar fertilizante marcado con fósforo 33 para estimar la eficiencia de la utilización de fósforo en la producción de forrajes leguminosos.

D.2.6. Mejora del manejo de los pastos para la sostenibilidad de la ganadería y el medio ambiente

233. Los sistemas de silvopastoreo en los que se integra la silvicultura con el pastoreo de animales ofrecen ventajas con respecto a los sistemas de producción ganadera de pastoreo de hierba solamente³⁴. El silvopastoreo no sólo reduce al mínimo las emisiones de GEI y la contaminación química del suelo y las vías fluviales, sino que también preserva la biodiversidad al reducir al mínimo la utilización de vehículos, fertilizantes y herbicidas (figura D-3). Además, el silvopastoreo ayuda a obtener un suelo sano, con mejor retención de agua y alimento adicional en forma de hojas ricas en proteína para que pasten más animales, así como sombra para que éstos estén más cómodos cuando las temperaturas son altas, lo que a su vez los estimula a pastar durante más tiempo y nutrirse mejor, dando así lugar a un aumento de la producción leche y/o carne por unidad de área de tierra en comparación con el pastoreo en pastos despejados. Los métodos de agua doblemente marcada (con oxígeno 18 e hidrógeno 2) permiten estimar el gasto calórico de los animales de pastoreo.



Fig. D-3. Los sistemas de silvopastoreo para la producción pecuaria mitigan las emisiones de GEI y la contaminación química del suelo y las vías fluviales, y preservan la biodiversidad.

³⁴ <http://www.cam.ac.uk/research/news/sustainable-livestock-production-is-possible>.

D.2.7. Gestión y reciclaje del estiércol mediante la tecnología del biogás

234. Durante el almacenamiento y el procesamiento, la materia orgánica del estiércol se convierte en metano y nitrógeno que da lugar a emisiones de óxido nitroso. Las emisiones aumentan cuando el estiércol se maneja en un medio líquido, como en lagunas profundas o en depósitos de almacenamiento temporal. Se pueden utilizar excrementos marcados con nitrógeno 15 estable para monitorizar el destino final del nitrógeno excretado en el medio ambiente y para generar datos relativos a las emisiones de GEI.

235. El biogás es una fuente de energía renovable que puede generarse a partir del estiércol mediante la digestión microbiana anaerobia de su contenido orgánico. La producción de biogás reduce la contaminación de las aguas residuales con elementos orgánicos que, de otro modo, consumirían oxígeno y harían que los niveles de oxígeno en las aguas superficiales fuesen bajos. Los efluentes del biogás también conservan el nitrógeno y fósforo del suelo como nutrientes para la producción de cultivos. Además, el gas contiene carbono fijado en las plantas a partir del dióxido de carbono atmosférico, como resultado de lo cual la producción de biogás es neutra en carbono y no contribuye a las emisiones de GEI. Según la FAO, si todo el estiércol vacuno se convirtiese en biogás en vez de dejar que se descomponga, se podrían reducir las emisiones mundiales de GEI en un 4 % o 99 millones de toneladas métricas³⁵.

D.3. Conclusiones

236. Las técnicas nucleares unidas a la utilización de instrumentos moleculares pueden aplicarse en actividades de investigación y de desarrollo tecnológico innovadoras para producir incrementos sostenibles de la producción pecuaria y reducir al tiempo las emisiones de GEI. Lograr estos dos objetivos adquiere cada vez más importancia conforme la población humana y su demanda de productos de origen animal aumentan y la mitigación del cambio climático se hace más necesaria que nunca.

237. El Programa Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura siga elaborando y validando información y conjuntos de tecnologías para contribuir la mitigación de los GEI a escala mundial. Esos conjuntos mejorarán la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. A fin de que tengan el máximo impacto es importante tomar conciencia de la disponibilidad de estas tecnologías y las prácticas antes descritas, y contar con una amplia participación de las partes interesadas (el sector privado, la sociedad civil, las organizaciones internacionales, la comunidad investigadora y la comunidad académica) para abordar los aumentos de la producción ganadera y su aportación (o posible aportación) a los GEI.

E. Imaginología digital y telerradiología: acontecimientos, tendencias y desafíos recientes

E.1. Tecnología y ventajas de la imaginología digital

238. Hasta el final del siglo pasado, en la inmensa mayoría de los exámenes mediante imaginología médica se empleaba una película como medio para obtener, visualizar y almacenar imágenes. No obstante, la revolución de la imagen digital en el diagnóstico médico por imágenes comenzó en el

³⁵ GERBER et al., “Tackling climate change through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities”, FAO, Roma (2013).

decenio de 1970 con la invención del escáner de tomografía computarizada (TC) y el desarrollo de los actuales escáneres de tomografía por emisión de positrones. El desarrollo de esas técnicas de imaginología nuclear precedió a la aparición en el decenio de 1980 de la imaginología por resonancia magnética (MRI), que es una técnica de imaginología no nuclear, y a la invención en el decenio de 1990 de los sistemas digitales de adquisición de imágenes por rayos X (como la radiografía computarizada y la radiografía digital). Las técnicas modernas de imaginología médica, como la TC, la tomografía por emisión de positrones (PET) y la MRI, generan un volumen de información de diagnóstico muy superior al de las anteriores, por lo que resulta necesario gestionar esa información de forma eficaz y eficiente. Esa necesidad creciente ha conducido a la adopción generalizada de tecnologías de gestión de imágenes digitales, que actualmente son el método que se prefiere para obtener, visualizar y almacenar imágenes debido a su capacidad de aumentar la rentabilidad y accesibilidad de las técnicas modernas de imaginología nuclear y no nuclear.

239. Los medios de obtención, almacenamiento y visualización de imágenes digitales presentan de forma inherente una serie de ventajas con respecto a las modalidades basadas en películas que posibilitan los beneficios mencionados (cuadro 1). Si bien el costo inicial del equipo digital es superior al de los sistemas convencionales, la tecnología digital permitiría realizar economías globales a largo plazo mediante la reducción de los gastos de funcionamiento, ya que no requiere productos químicos, películas, ni el manejo y almacenamiento de estas últimas. A pesar de esas ventajas, resulta complejo poner en marcha sistemas de imaginología médica totalmente digitales, que abarquen la elaboración de informes, el archivo y la distribución de imágenes (figura E-1). Esos sistemas no están preconfigurados ni son una solución tecnológica que sirva para todos los casos, pues deben adaptarse a las diferentes actividades de diagnóstico y usuarios finales y es necesario recibir una capacitación considerable para conocer su funcionamiento.

Cuadro E-1. Ventajas de la radiología digital con respecto a la radiología convencional basada en películas³⁶

1	Difusión eficaz de la información y mayor acceso a las imágenes
2	Sistemas de adquisición de imágenes digitales mucho más dinámicos para obtener un mayor número y variedad de estructuras anatómicas en cada imagen
3	Aumento de la fiabilidad y recuperación de imágenes sin errores ni pérdida de información de diagnóstico
4	Facilidad de uso
5	Posibilidad de obtener imágenes compuestas utilizando modalidades múltiples
6	Conservación de información de diagnóstico dinámica como serie de imágenes digitales
7	Transmisión y visualización simultáneas de imágenes en múltiples zonas geográficas
8	Manipulación y tratamiento de imágenes, determinación y mejora de aspectos concretos
9	Facilidad de interacción entre los especialistas, como los radiólogos, y los médicos remitentes
10	Posibilidad de transmitir ampliamente conocimientos especializados en subespecialidades de diagnóstico por imágenes
11	Disponibilidad de los estudios para las personas autorizadas inmediatamente después de la adquisición de las imágenes
12	Posibilidad de secuenciar y adaptar los exámenes y de integrar datos de diagnóstico
13	Eliminación de problemas ambientales, como películas descartadas o desechos químicos

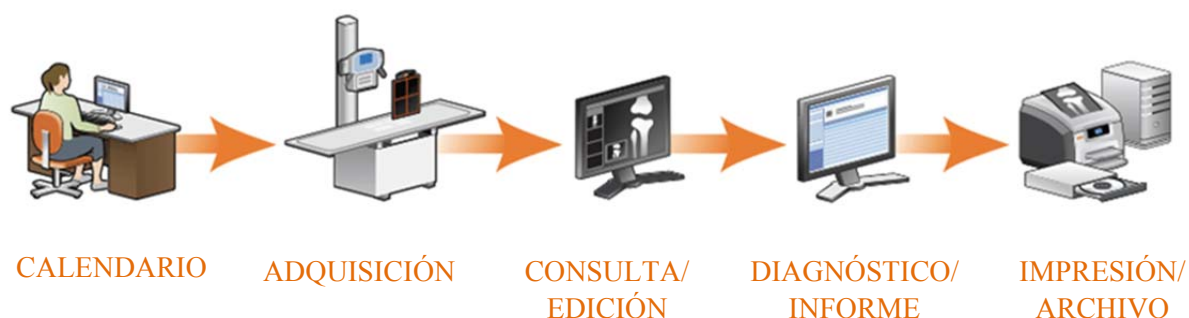


Fig. E-1. Flujo habitual de una cadena de obtención de imágenes digitales (fuente: www.carestream.com).

E.2. Transición de los sistemas analógicos a los digitales

E.2.1. Desafíos generales

240. A pesar de que las repercusiones globales de la imagenología digital son muy positivas en general, la transición de la radiología convencional (pantalla-película) a la imagenología digital constituye un desafío importante que requiere una aplicación eficaz. Durante un siglo se han utilizado

³⁶ ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, "Worldwide Implementation of Digital Imaging in Radiology", OIEA, Viena (en preparación).

métodos tradicionales basados en películas que no será fácil abandonar. Además, los costos de capital necesarios, incluidos los destinados al desarrollo de capital humano, y la necesidad de avanzar con rapidez hacia la tecnología digital plantea desafíos para algunos usuarios. En este sentido, las estrategias de comunicación y el conocimiento de los principios de la gestión del cambio son esenciales.³⁷ Ello representa un reto particular, dado que el tiempo y la inversión que se precisa para llevar a cabo este tipo de transiciones varía considerablemente y depende en gran medida de las circunstancias al comienzo del proceso.

241. Si bien esas medidas pueden reducir al mínimo las dificultades provocadas por los cambios, con frecuencia habrá un período de adaptación durante el cual la transición podría ser confusa, perturbadora o incluso disfuncional. No obstante, en casi todo el mundo, tras el período inicial de uso de la imaginología digital, los usuarios terminan reconociendo y valorando las ventajas que esta presenta con respecto a la imaginología basada en películas.

E.2.2. Aplicación y desafíos específicos para el personal médico

242. El personal de radiología (radiólogos, radiógrafos, físicos médicos y personal de asistencia) debería formar parte de un grupo consultivo del personal más amplio que proporcionara conocimientos especializados sobre el tema para el proyecto. De ese modo, todo el personal de radiología tendrá la oportunidad de formular observaciones sobre los planes y planos en curso y de hacer su aportación. En el plan de aplicación se debería planificar la capacitación nueva que será necesario impartir, comprendidas nociones básicas de informática. Como la velocidad máxima de toda transición depende de la capacidad del personal de adoptar el cambio, la existencia de un programa de perfeccionamiento y capacitación eficaz y permanente del personal es uno de los componentes esenciales de los proyectos de imaginología digital.

243. Los usuarios finales de cualquier servicio de radiología son los médicos que remiten pacientes. La ausencia de películas podría perturbar el trabajo de algunos médicos y, por tanto, al principio la introducción de la imaginología digital podría afectar a la prestación de sus servicios clínicos. Los médicos deben recibir capacitación en el uso de sistemas informáticos para la distribución de imágenes y serán una valiosa fuente de retroinformación, tanto positiva como negativa, para la difusión eficaz de la imaginología digital fuera del ámbito de la radiología. En la fase de planificación del proyecto, ha de quedar clara la manera en que se atenderá a los usuarios existentes durante la transición a la imaginología digital y después de ella. En la planificación también se deberían indicar los médicos y departamentos que tengan requisitos particulares para el servicio de imaginología médica (por ejemplo, cardiología y ortopedia). Es fundamental que haya una estrecha interacción entre esas personas y el equipo encargado de poner en práctica la imaginología digital. Es sumamente importante aclarar que el servicio se establece para beneficiarles en la mayor medida posible como usuarios de los servicios de radiología.

244. Si un servicio dispone de un departamento o sección de TI interno o local, convendría dar participación a ese grupo desde el principio en la preparación de la transición a la imaginología digital. Ahora bien, es indispensable que el grupo de TI entienda que las soluciones deben ajustarse a las normas y prácticas que están bien definidas a escala mundial en la comunidad de la imaginología digital. Para ello, podría ser necesario elaborar un memorando de entendimiento entre el comité directivo del proyecto y el grupo de TI con objeto de definir las aportaciones necesarias. Si los programas informáticos gratuitos y los equipos informáticos disponibles llegan a formar parte de la

³⁷ COLEGIO AMERICANO DE RADIOLOGÍA, ASOCIACIÓN AMERICANA DE FÍSICOS EN MEDICINA, SOCIEDAD DE IMAGINOLOGÍA INFORMÁTICA EN MEDICINA, ACR–AAPM–SIIM Technical Standard for Electronic Practice of Medical Imaging, Reston, VA, Estados Unidos de América (2012).
<http://www.acr.org/~media/ACR/Documents/PGTS/standards/ElectronicPracticeMedImg.pdf>

solución, el grupo de TI local debería preparar esos componentes mucho antes de que tenga lugar la instalación prevista del equipo de adquisición de imágenes.

E.3. Telerradiología

245. Una de las principales ventajas de la tecnología de imagenología digital es que, por medio de las aplicaciones de la telerradiología, esta tecnología permite dar a conocer el diagnóstico establecido por los especialistas independientemente de la distancia que haya entre el lugar donde se obtiene la imagen y el lugar donde se encuentra el especialista. Si bien puede definirse de muchas maneras, en términos generales la telerradiología es la transmisión de un conjunto de imágenes de alta resolución y con la máxima integridad del color a un centro ubicado en un lugar apartado de aquel en el que se obtienen las imágenes, a los efectos de la interpretación del diagnóstico inicial y/o una segunda opinión del especialista. Este tipo de tecnologías ya se utiliza ampliamente en los países desarrollados, y aunque algunos países en desarrollo también están utilizando la telerradiología, su aplicación en estos países aún es limitada.³⁸

246. La telerradiología se puede utilizar localmente (es decir, en la misma instalación), entre edificios de un complejo compartido o en una sola ciudad, o entre establecimientos de salud de cualquier parte del mundo. Esta técnica ofrece alternativas a los métodos tradicionales de interpretación de imágenes, que requieren personal sobre el terreno capacitado para efectuar interpretaciones radiológicas. La telerradiología permite:

- mejorar el acceso a la opinión médica especializada, a los efectos de una primera o de una segunda interpretación;
- proporcionar acceso a los informes sobre las imágenes médicas en el caso de los centros que no prestan suficientes servicios;
- servir de apoyo a las consultas de los pacientes y respaldar las decisiones relativas a sus tratamientos;
- proporcionar acceso a los servicios de interpretación de imágenes en las regiones remotas;
- transmitir los informes con miras a la interpretación oportuna de las imágenes después del horario normal de trabajo, y
- distribuir de manera equilibrada la carga de trabajo relacionada con los informes entre centros con diferente dotación de personal para garantizar la entrega oportuna de los informes.

E.3.1. Tecnología

247. La telerradiología ha evolucionado para adoptar la tecnología moderna y ofrecer distintas aplicaciones.³⁹ Cuando se utiliza con un sistema de archivo y comunicación de imágenes al que se puede acceder a distancia, o un archivo centralizado, es imposible diferenciar la telerradiología de cualquier otra forma de acceso a distancia. Generalmente se utilizan internet y la tecnología del cliente ligero basada en la web (que requiere una computadora con conexión a un servidor para poder funcionar plenamente). Entre otros usos ahora posibles gracias a estos adelantos figuran el trabajo de interpretación a domicilio a tiempo parcial o completo, la distribución equilibrada del trabajo de interpretación entre los distintos centros, comprendidos los que se encuentran en diferentes zonas

³⁸ PAL, A., MBARIKA, V. W., COBB-PAYTON, F., DATTA, P., MCCOY, S., “Telemedicine diffusion in a developing country: the case of India”, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine 9 (2005), 59-65; ZENNARO, F., et al., “Digital Radiology to Improve the Quality of Care in Countries with Limited Resources: A Feasibility Study from Angola”, PLoS One, 8 (2013).

³⁹ JOHNSON, N. D., “Teleradiology 2010: technical and organizational issues”, Pediatric Radiology, 40 (2010), 1052-1055.

horarias, la subcontratación a terceros que pueden proporcionar servicios especializados adicionales de trabajo de interpretación de emergencia y/o final.

248. Desde el punto de vista técnico, es posible transferir todo tipo de imágenes a casi prácticamente cualquier lugar del mundo, pero para que los servicios de telerradiología sean eficaces también se requiere que sus flujos de trabajo sean adecuados a fin de que puedan atender un gran número de solicitudes de telerradiología de manera eficiente. Las imágenes se obtienen en una amplia gama de tamaños, que pueden ir de unos cuantos a centenares de megabytes, y la transferencia de imágenes de gran tamaño puede ser sumamente lenta y, por ende, poco práctica. Así pues, la red disponible es un componente fundamental de las aplicaciones de telerradiología que requiere una planificación adecuada y suficientes recursos, factores que podrían constituir un obstáculo para la adopción de esta tecnología.

249. El tipo de red dependerá de la disponibilidad local y el ancho de banda requerido dependerá del tamaño y volumen de la imagen que deberá transferirse. Ahora bien, la capacidad de los sistemas locales para proporcionar acceso a distancia puede verse limitada por problemas relacionados con el funcionamiento de la red, especialmente en zonas rurales y también en zonas con problemas de seguridad, debido particularmente a la necesidad de proporcionar a los usuarios externos credenciales de autenticación y de controlar su acceso.

250. El equipo de telerradiología, comprendido todo el equipo de adquisición de imágenes, debe ajustarse a las normas de la Organización Internacional de Normalización correspondientes a la imaginología digital y las comunicaciones en medicina respecto de la comunicación con las estaciones de trabajo, los dispositivos de telecomunicaciones y el almacenamiento de imágenes. En algunos lugares no existen (ni se prevé crear) medios de conexión con los médicos remitentes ni servicios de lectura de telerradiología, mientras que en otros se pueden utilizar las redes internas y externas como parte de la cadena de imaginología médica.

251. Por último, como hoy en día la distancia entre el lugar donde se generan las imágenes clínicas y el lugar donde estas se examinan y donde se elaboran los informes conexos pertinentes puede ser considerable, es importante que ambos tengan claramente definidas y acordadas las responsabilidades de cada cual y las políticas en materia de acceso a la información que deben seguirse a fin de garantizar el mantenimiento del carácter confidencial de los datos del paciente.

E.3.2. Ejemplos de aplicación

252. La telerradiología es distinta de la transmisión de un pequeño número de imágenes de calidad limitada que se envían principalmente con fines de discusión o demostración. Un ejemplo de esto último es el uso de tecnologías de comunicación no médicas tales como la telefonía móvil o el correo electrónico. La mayoría de los teléfonos móviles y otras formas de equipo informático portátil actualmente en uso tienen una memoria, conexión en red y velocidad del procesador limitadas, por lo que es poco probable que se puedan utilizar a los efectos de la interpretación de diagnósticos iniciales y la transmisión de los informes pertinentes. Ahora bien, esta situación está cambiando rápidamente y cabe prever que en un futuro cercano esos dispositivos adquieran creciente importancia en el envío y el examen de imágenes médicas.

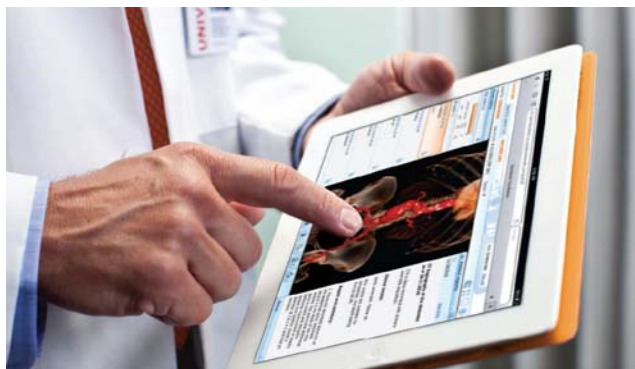


Fig. E-2. Imagen de TC en una tableta (fuente: www.carestream.com).

253. Uno de los ejemplos más comunes de aplicación de la telerradiología es la conexión de los hospitales de la periferia de un país o región con una institución central. Esta tecnología permite a los médicos de las zonas rurales, que quizás no tengan experiencia en la interpretación de imágenes, obtener asistencia de médicos especialistas de hospitales universitarios o especializados más grandes, en la interpretación de diagnósticos iniciales para poder efectuar un diagnóstico preciso y ofrecer así un tratamiento más eficaz localmente o, de ser necesario, decidir si es preciso transferir al paciente a una instalación que preste una atención de más alto nivel. Los beneficiarios directos de esos proyectos de telerradiología son el personal del hospital pertinente y, lo que es más importante, los pacientes cuyas imágenes son examinadas por un radiólogo especializado⁴⁰.

254. Se ha demostrado que los exámenes mamográficos son un instrumento muy eficaz para la detección temprana del cáncer de mama. Varios estudios han demostrado un aumento en la detección de casos de cáncer de mama como resultado de la adopción del método de doble lectura (consistente en la lectura de las imágenes por dos expertos a fin de garantizar un diagnóstico más fiable) y de la experiencia acumulada en el examen de imágenes por los encargados de su lectura.⁴¹ En un marco de telerradiología (telemamografía) organizado, los centros que participan en un programa de detección se beneficiarían considerablemente de la segunda lectura independiente de los mamogramas por radiólogos especializados de una unidad central de imágenes del seno (figura E-3). Dado el gran número de imágenes que examinan, estos especialistas tendrían conocimientos avanzados y experiencia en la lectura de mamografías y podrían mejorar la eficacia del programa de detección.



Fig. E-3. Estación de trabajo de mamografía digital (fuente: www.healthcare.siemens.co.uk).

⁴⁰ ZENNARO, F., et al., “Digital Radiology to Improve the Quality of Care in Countries with Limited Resources: A Feasibility Study from Angola”, PLoS One, 8 (2013).

⁴¹ LEADER, J. K., et al., “A Multisite Telemammography System for Remote Management of Screening Mammography: An Assessment of Technical, Operational, and Clinical Issues”, Journal of Digital Imaging, 19 (2006), 216–225.

E.4. Conclusiones

255. Dadas las ventajas y posibilidades que ofrece la imaginología digital, se observa una tendencia a utilizar cada vez menos las imágenes basadas en películas para recurrir con mayor frecuencia a sistemas digitales de obtención, procesamiento y visualización de las mismas por medios digitales que pueden aumentar la eficacia y accesibilidad de importantes técnicas de imaginología nucleares y no nucleares. Esta tendencia es en la actualidad más pronunciada en el mundo desarrollado, aunque los países en desarrollo también comienzan a beneficiarse de la aplicación de la tecnología digital en exámenes radiológicos, y podrían hacerlo incluso más si la utilizaran más ampliamente.

256. La telerradiología puede llegar a convertirse en un método práctico y eficaz para hacer frente al problema de la distribución geográfica desigual y la falta de especialistas en imaginología a nivel local. El papel cada vez más importante de la tecnología podría ayudar a aliviar la falta de personal, aunque se requerirán nuevas funciones de apoyo a la infraestructura técnica. El desafío que enfrentan los países en desarrollo consiste en encontrar una metodología que se ajuste a sus necesidades y circunstancias para poder pasar eficazmente de los métodos de procesamiento y archivo de películas convencionales a sistemas digitales de adquisición y visualización de imágenes.

F. Tecnología de las radiaciones para el tratamiento de aguas residuales y biosólidos: Soluciones para proteger el medio ambiente

F.1. Función de la tecnología de las radiaciones en la protección del medio ambiente

257. La urbanización e industrialización constantes de la sociedad en todo el mundo es uno de los principales factores que contribuyen a la contaminación de las ya mermadas reservas de agua dulce y a la generación de enormes cantidades de lodo de aguas residuales municipales. La aparición de contaminantes orgánicos, como los productos farmacéuticos, los tintes para textiles, los insecticidas y los disruptores endocrinos, en aguas residuales y lodo ha agravado aún más el problema, ya que esas sustancias químicas, incluso en cantidades insignificantes, pueden afectar profundamente a la vida acuática, los animales terrestres y los seres humanos. El tratamiento de los efluentes industriales y de aguas residuales y el lodo ayuda a conservar los recursos hídricos y a mejorar las condiciones del suelo.

258. Gracias a los continuos avances de la tecnología del tratamiento de las aguas residuales y los requisitos cada vez más rigurosos exigidos para la descarga de aguas residuales, se garantiza que la mayoría de los efluentes de aguas residuales tratados son seguros para proceder a su descarga. Sin embargo, el tratamiento no basta para posibilitar la reutilización del agua o el uso del lodo y, por tanto se deberían investigar aplicaciones alternativas. Las técnicas de las radiaciones basadas en tecnologías de rayos gamma y haces de electrones se han utilizado con buenos resultados para demostrar la utilidad del tratamiento de las aguas residuales de los tintes para textiles industriales y el saneamiento del lodo de aguas residuales para las aplicaciones agrícolas.

259. A pesar de que la tecnología de las radiaciones para el tratamiento de distintos contaminantes orgánicos todavía no se ha adoptado de forma generalizada para su uso a gran escala, su utilidad y eficacia se han demostrado en varias escalas de funcionamiento, y la tecnología ofrece muchas posibilidades de hacer frente a los nuevos desafíos que plantea el tratamiento de las aguas residuales y el lodo. Dado que generalmente los efluentes y desechos industriales no se mezclan, sino que es

necesario tratarlos en la fuente, esas tecnologías podrían configurarse para adaptarlas a diferentes necesidades de tratamiento de desechos.

F.2. Cuestiones actuales en la esfera del tratamiento de las aguas residuales y el lodo para su reutilización

260. A medida que se ha agravado la escasez de agua, ha aumentado el interés por la reutilización del agua en todo el mundo. No obstante, al mismo tiempo, la posibilidad de que el agua se contamine con microbios y productos químicos, especialmente con nuevos contaminantes traza, se ha convertido en un motivo de preocupación creciente. Por consiguiente, es fundamental desarrollar tecnologías de recuperación de agua rentables y fiables para ejecutar con eficacia los proyectos de reutilización del agua.

261. Actualmente se están probando tecnologías de tratamiento avanzadas, como las tecnologías de las radiaciones y sus combinaciones con procesos convencionales, a fin de producir agua de alta calidad para la reutilización indirecta como agua potable, es decir, agua reciclada que es objeto de un tratamiento especial antes de someterla al tratamiento del agua convencional para uso como agua potable. Se prevé que estas tecnologías lleguen a ser las tecnologías de tratamiento predominantes en el futuro próximo.

262. Si bien la tendencia creciente a aplicar normas cada vez más estrictas sobre la descarga de aguas residuales ha sido beneficiosa para el medio ambiente, esas normas también han conducido al aumento del fango de alcantarillado generado. Actualmente existen varias opciones para deshacerse del lodo de aguas residuales, como la incineración, su depósito en vertederos o su uso como fertilizante o nutriente del suelo, aunque la composición del lodo puede limitar dichas opciones.

263. En el futuro se prevé que las plantas de tratamiento de aguas residuales sean lugares en los que se realizan operaciones de recuperación de recursos de gran valor, y no meramente lugares para el tratamiento y eliminación subsiguiente de desechos municipales. Ahora bien, para que ello se haga realidad, es esencial determinar tecnologías que puedan desinfectar y estabilizar biosólidos municipales de forma rentable. A este respecto, cada vez se está prestando más atención a la producción de biosólidos de alta calidad que no presenten riesgos para la salud pública o el medio ambiente y puedan utilizarse de modo beneficioso.

F.3. Situación actual de las aplicaciones de la tecnología de las radiaciones en el tratamiento de las aguas residuales y el lodo

F.3.1. Tratamiento con haces de electrones de aguas residuales del teñido de textiles

264. La industria del teñido de textiles y la fabricación de tintes provoca cerca del 20 % de la contaminación del agua industrial a escala mundial. En el mundo se fabrican anualmente más de 700 millones de toneladas de tintes y los procesos de teñido necesitan mucha agua, ya que hacen falta 80 000 m³ de agua aproximadamente por cada tonelada de textiles acabados. El agua efluente generada por la industria entraña una elevada demanda química de oxígeno, que es indicio de altas concentraciones de contaminantes orgánicos y baja biodegradabilidad debido a la salinidad y a la presencia de una gran variedad de productos químicos.

265. El proceso de tratamiento biológico convencional aplicado a las aguas residuales del teñido no solo requiere mucho tiempo, sino que además no puede degradar tintes sintéticos a causa de sus estructuras químicas complejas. Se ha demostrado que los electrones de alta energía de los aceleradores de haces de electrones degradan esos tintes complejos eficazmente, convirtiéndolos en moléculas más simples para facilitar su ulterior biodegradación. El proceso es fácil de integrar en el proceso de tratamiento biológico existente. Se ha mostrado que la presencia de partículas sólidas con hasta el 3 % de arcilla no repercute negativamente en la destrucción de los productos químicos. Las soluciones que contienen compuestos de

gran absorción de luz no reducen la eficacia del proceso y para este no se necesitan más productos químicos. Debido al nivel de degradación logrado, los subproductos son vulnerables a los subsiguientes procesos de tratamiento biológico, reduciendo así al mínimo los costos del tratamiento. Los aceleradores que utilizan una potencia de hasta 400 kW han resultado sumamente fiables y resistentes y su disponibilidad operacional es $\geq 99\%$. Los aceleradores están totalmente automatizados para que funcionen *in situ* y a distancia y su vida útil es de más de 30 años.

266. La instalación de haces de electrones del Complejo Industrial de Teñidos de Daegu (República de Corea) ha demostrado la eficacia de la tecnología de haces de electrones para tratar diariamente hasta 10 000 m³ de aguas residuales del teñido de textiles a una dosis de 1 kilogray (kGy) y a un costo de 0,30 dólares de los Estados Unidos por m³.⁴² El costo de ese acelerador de alta potencia es de unos dos millones de dólares para el acelerador y su instalación, mientras que las tuberías y otros equipos y trabajos de construcción cuestan un millón de dólares aproximadamente. En la actualidad, es la única instalación de ese tipo en el mundo y los costos iniciales declarados son un obstáculo para establecer instalaciones adicionales. Habida cuenta del incremento de los costos de la reglamentación y restauración ambiental en algunos países, muchas empresas de teñido de textiles se están trasladando a países donde la normativa ambiental es menos estricta, lo que pone de manifiesto la necesidad de aumentar las capacidades y la rentabilidad de esas tecnologías para alentar una adopción más amplia de las mismas.



Fig. F-1. Tratamiento de aguas residuales usando un acelerador de haces de electrones (fotografía: EB Tech, República de Corea).

F.3.2. Tratamiento del lodo usando radiación de alta energía

267. La radiación de alta energía es un método eficaz y eficiente para inactivar bacterias patógenas y la tecnología ya se utiliza a gran escala en el mundo para esterilizar equipo médico. Partiendo de un concepto similar, en muchos países se ha estudiado el uso de la tecnología de las radiaciones para esterilizar el lodo de aguas residuales. Se ha observado que el lodo esterilizado es un portador eficaz de bacterias útiles, como el rizobio, que ayuda a fijar el nitrógeno en la tierra, y se ha demostrado que

⁴² HAN Bumsoo et al., "Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant", *Radiation Physics and Chemistry*, 81 (2012), 1475–1478.

es un excelente estiércol enriquecido en ensayos a gran escala.⁴³ Por tanto, los biosólidos pueden sustituir a fertilizantes químicos menos respetuosos con el medio ambiente.

268. El funcionamiento satisfactorio y continuo desde 1992 de la instalación del irradiador de investigación para la higienización de los lodos (SHRI) de Vadodara (India) ha mostrado que la irradiación de lodo de aguas residuales, cuyo contenido sólido es del 5 % aproximadamente, con rayos gamma de cobalto 60 con una dosis de 3 kGy puede inactivar el 99,99 % de las bacterias patógenas. La tecnología es fácil de integrar en las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes. Además, agricultores y horticultores han utilizado eficazmente el subproducto del estiércol orgánico resultante del funcionamiento de la instalación del SHRI, demostrando que conduce al aumento de la productividad. Sin embargo, el elevado rendimiento que se requiere para el proceso de tratamiento y la necesidad del reabastecimiento periódico de enormes cantidades de cobalto 60 han limitado la difusión de esta tecnología que podría ser útil.

269. En los últimos años la tecnología de haces de electrones de alta energía ha resultado ser muy eficaz como tecnología de desinfección, lo que ha dado lugar a reducciones considerables de distintos patógenos bacterianos y virales específicos. Los resultados indican que las dosis de 8 a 15 kGy destruyeron un número importante de patógenos bacterianos, virales y protozoicos. Se han elaborado, modelizado y validado empíricamente las especificaciones técnicas de un sistema de tratamiento mediante haces de electrones de alta energía capaz de proporcionar las dosis necesarias. Las simulaciones de Monte Carlo (una técnica matemática computarizada que ayuda a explicar el riesgo en análisis cuantitativos y procesos de adopción de decisiones) y pruebas empíricas han confirmado que es técnicamente viable y rentable administrar dosis de haces de electrones uniformes a corrientes de biosólidos de diferentes concentraciones de sólidos y calidad de agua a razón de 1 500 m³/día aproximadamente.⁴⁴ Además de la viabilidad técnica, los análisis de la estimación de los costos preliminares indican que la desinfección basada en haces de electrones de alta energía puede ser sumamente rentable con respecto a algunos tratamientos modernos, como la digestión por bacterias termofílicas para el secado térmico, el compostaje y la estabilización con cal.

270. Asimismo, se ha logrado la desinfección sinérgica de patógenos cuando la irradiación con haces de electrones se combinó con oxidantes químicos, como el dióxido de cloro y el ferrato. Se ha observado que la combinación de la irradiación con haces de electrones y el tratamiento del ferrato es eficaz para desinfectar patógenos microbianos, destruir la actividad estrogénica y estabilizar biosólidos. La combinación de un irradiador de haces de electrones y ferrato para producir biosólidos de alta calidad cuesta aproximadamente 70 dólares/tonelada seca, que es un costo bastante inferior al de otras tecnologías modernas. La posibilidad de desinfectar y estabilizar biosólidos municipales combinando la irradiación con haces de electrones y oxidantes químicos ofrece varias oportunidades de reutilizar biosólidos y recuperar recursos.

F.4. Tecnologías de las radiaciones para abordar los nuevos contaminantes del agua

271. En la esfera del tratamiento del agua, existe una creciente preocupación por los productos químicos llamados disruptores endocrinos (productos químicos que pueden causar enfermedades al interferir con los sistemas hormonales), así como los productos de cuidado personal y los productos farmacéuticos, ya que no se pueden eliminar o destruir completamente mediante los procesos de tratamiento convencionales. Los indicios de estos productos químicos, que son peligrosos para los

⁴³ GAUTAM S. et al., "Gamma irradiation of municipal sludge for safe disposal and agricultural use", *Water Environment Research* 77 (2005), 472–479.

⁴⁴ PILLAI S., Texas A&M AgriLife Research, Personal communication (2013).

animales acuáticos a 1 ng/dm^3 , son difíciles de tratar con los métodos existentes. Además, sus concentraciones en los medios de agua dulce que tienden a recibir descargas de aguas residuales se han ido incrementando gradualmente debido al aumento de la población y la diversificación a escala mundial de los productos farmacéuticos actualmente en uso.

272. Esos compuestos pueden tratarse mediante técnicas emergentes que utilizan radicales libres en procesos de oxidación avanzada. Se tiene noticia de que métodos basados en la radiación ionizante han sido eficaces en la descomposición de contaminantes orgánicos persistentes como la dioxina, los bifenilos policlorados y los disruptores endocrinos⁴⁵. Se ha demostrado que la irradiación por rayos gamma a una dosis de 200 Gy degrada los disruptores endocrinos y sus productos de irradiación presentes en las aguas residuales. El costo estimado de una planta de tratamiento en la que se emplee con esa finalidad un irradiador de haces de electrones es de 0,17 dólares/m³. Experimentos realizados con productos farmacéuticos también han mostrado que medicamentos como el diclofenaco, cuya nocividad para las especies de agua dulce está demostrada, se pueden eliminar eficazmente del agua utilizando la tecnología de irradiación⁴⁶.

273. En 2010, el Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea (KAERI) desarrolló un acelerador de haces de electrones móvil que se ha utilizado para hacer un estudio de campo sobre el tratamiento de muchos productos químicos de ese tipo presentes en el efluente de aguas negras. Los principales antibióticos y disruptores endocrinos con concentraciones iniciales de 0,5 mg/l fueron descompuestos completamente mediante una dosis de irradiación de menos de 1,5 kGy, y las bacterias coliformes y otros microorganismos también fueron esterilizados con la misma dosis de irradiación. El estudio mostró que la toxicidad en las algas derivada de los antibióticos se reducía con la exposición a la irradiación. El acelerador de haces de electrones móvil fue diseñado para usarse como dispositivo de demostración y puede transportarse fácilmente a diversas instalaciones industriales a fin de mostrar el potencial que ofrecen ese tipo de aceleradores para el tratamiento eficaz en función del costo de distintos tipos de aguas residuales, con el objetivo de promover la adopción de la tecnología. Los resultados que se obtuvieron con ese estudio jugaron un papel importante en la concesión por el Ministerio de Medio Ambiente coreano de una certificación de tecnología nueva excelente en relación con el tratamiento avanzado de los efluentes de aguas negras mediante radiación⁴⁷.

⁴⁵ KIMURA A., et al., “Decomposition of persistent pharmaceuticals in wastewater by ionizing radiation”, *Radiation Physics and Chemistry*, 81 (2012), 1508–1512 y las referencias allí citadas.

⁴⁶ HOMLOK R., et al., “Elimination of diclofenac from water using irradiation technology”, *Chemosphere*, 85 (2011), 603–8.

⁴⁷ LEE M.J., et al., “Radiation induced decomposition of emerging organic pollutants in sewage effluent and PCBs in various matrices”, artículo presentado en la Reunión Técnica del OIEA sobre tratamiento radiológico de contaminantes, aguas residuales y lodos, 4 a 8 de marzo de 2013, OIEA, Viena.



Fig. F-2. Acelerador de haces de electrones móvil instalado en la planta de tratamiento de aguas negras (fotografía cortesía del KAERI).

F.5. Necesidades y desafíos futuros en materia de investigación

274. Si bien los procesos relacionados con las aplicaciones de las tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de aguas residuales, lodos y otros contaminantes se conocen y están establecidos bastante bien, los desafíos incipientes que probablemente afectarán a la industria en los próximos años, así como las posibles ventajas de la utilización de aplicaciones nuevas para responder a esos desafíos, sugieren que se debería seguir trabajando en el desarrollo de estas aplicaciones. Esos desafíos incipientes representan futuras oportunidades de apoyar la expansión de la tecnología de las radiaciones aplicada a la restauración ambiental en las actividades industriales.

275. Uno de esos desafíos es la presencia en aguas residuales y lodos de nuevos productos químicos que despiertan preocupación, lo que exige un análisis exhaustivo y sistemático en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Esta capacidad de análisis es necesaria para poder evaluar si en las aguas residuales y en los lodos hay compuestos orgánicos tóxicos en concentraciones que entrañen un riesgo para la salud humana y animal y para el medio ambiente, y para posteriormente evaluar y garantizar la eficacia de la irradiación en el tratamiento de las aguas residuales.

276. La irradiación de efluentes terciarios para asegurar la máxima calidad del efluente antes de la descarga al medio ambiente presenta otro desafío, para el que se requieren datos empíricos sobre los niveles de desinfección tras el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales con aceleradores de haces de electrones. Asimismo, la disponibilidad de aceleradores móviles de haces de electrones ofrece nuevas oportunidades relacionadas con el suministro de agua limpia desinfectada no potable en caso de desastres naturales o emergencias similares que puedan comprometer los servicios relacionados con el agua, pero en lo que respecta a estas aplicaciones se necesitan más estudios. Esto sería particularmente importante en el contexto del aumento de la frecuencia y gravedad de los desastres naturales asociados al cambio climático.

F.6. Conclusiones

277. La utilización de técnicas de irradiación para tratar aguas y lodos residuales ofrece posibilidades de abordar una variedad de necesidades y desafíos relacionados con el medio ambiente, la salud pública y los recursos. Se ha demostrado que son eficaces para el tratamiento de las aguas residuales de los

colorantes textiles industriales y el saneamiento de los lodos residuales con miras a proporcionar recursos adicionales destinados a aplicaciones agrícolas. Estudios recientes han demostrado las posibilidades que ofrece la degradación iniciada por irradiación para transformar nuevos componentes orgánicos que despiertan preocupación en sustancias menos nocivas o reducir sus concentraciones a valores permisibles. La utilidad y la eficacia de la tecnología de las radiaciones para el tratamiento de diversos contaminantes orgánicos ha sido adecuadamente demostrada a varias escalas de operación.

278. El desarrollo de instalaciones móviles de haces de electrones ha permitido a los tecnólogos radiológicos mostrar esos procesos a los usuarios finales en condiciones de trabajo reales, y las instalaciones móviles también se pueden usar para la respuesta en casos de desastre natural y otras emergencias. Además, aplicaciones como las mencionadas anteriormente tienen posibilidades de apoyar la reutilización de las aguas residuales tratadas para riego urbano y usos industriales, lo que ayudaría a responder a la creciente escasez de agua en todo el mundo debida al aumento de la demanda humana y el cambio climático. Con más actividades de investigación y desarrollo, las tecnologías de las radiaciones de este tipo pueden llegar a ser de gran valor para la humanidad.

G. Maneras de abordar las floraciones de algas nocivas en un medio marino cambiante

G.1. Tecnologías nucleares para rastrear las biotoxinas marinas en los alimentos de origen marino y el medio ambiente

G.1.1. Los efectos de las toxinas de las floraciones de algas nocivas en el comercio de alimentos de origen marino

279. En muchos países en desarrollo, los productos de los animales acuáticos son importantes como fuente de proteína animal y como mercancía para el comercio. La demanda mundial de alimentos de origen marino ha ido en aumento, estimulando tanto las importaciones como la producción local. Debido al estancamiento de las poblaciones de la pesca de captura, en la actualidad la acuicultura aporta más del 50 % del suministro total mundial de alimentos de origen marino. Estos son los productos alimentarios que más se comercializan internacionalmente y las exportaciones de alimentos de origen marino de los países en desarrollo sobrepasan el valor total de las del café, el cacao, el té, el tabaco, la carne y el arroz combinadas⁴⁸. Además, aproximadamente el 50 % de las exportaciones mundiales de alimentos de origen marino corresponden a los países en desarrollo⁴⁹.

280. La capacidad de los exportadores de cumplir los requisitos reglamentarios de los países importadores se ha convertido en un importante impedimento para acceder a los mercados en el sector de la pesca⁵⁰. Las importaciones de alimentos de origen marino como ostras, almejas, vieiras y mejillones deben cumplir requisitos de etiquetado, trazabilidad y certificación oficial a fin de garantizar su calidad e inocuidad. Las autoridades reguladoras locales de muchos países han concedido especial importancia al establecimiento y el cumplimiento de límites y criterios reglamentarios en relación con las biotoxinas marinas.

⁴⁸ FAO. Perspectivas Alimentarias: Informe semestral sobre los mercados alimentarios mundiales, FAO, Roma (2013).

⁴⁹ TACON A.G.J., METIAN M., "Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply", *Reviews in Fisheries Science*, 21 (2013), 22–38.

⁵⁰ FAO. Perspectivas Alimentarias: Informe semestral sobre los mercados alimentarios mundiales, FAO, Roma (2013).

281. Las biotoxinas marinas son producidas por determinadas algas marinas microscópicas que, en ciertas condiciones, florecen y alcanzan densidades elevadas, formando floraciones de algas nocivas (FAN), también denominadas “mareas rojas”. A través de la alimentación, los peces y mariscos pueden acumular esas biotoxinas y volverse peligrosos para el consumo humano. Así, los alimentos de origen marino pueden ser mortales aun cuando las aguas parezcan estar limpias y aparentemente no haya FAN. Los alimentos de origen marino tóxicos y los no tóxicos tienen el mismo sabor y aspecto, y la cocción o la congelación no destruyen las toxinas de las FAN.

282. Las toxinas de las floraciones de algas nocivas causan pérdidas económicas enormes a la industria del marisco debido a los cierres que se imponen a las instalaciones de captura cuando las toxinas presentes en el marisco sobrepasan los niveles reglamentarios. Cuando no existe un programa de reglamentación, la ausencia de controles relacionados con las toxinas de los alimentos de origen marino representa un riesgo para los consumidores y un impedimento para las exportaciones. Los episodios tóxicos también pueden provocar alarma social (comprendidos los efectos más amplios del rechazo de todo el marisco por parte de los consumidores no informados), y afectar de manera negativa a la industria del turismo y fomentar las importaciones de peces de zonas controladas en detrimento de la pesca local. Se pueden utilizar técnicas nucleares para detectar y medir las toxinas de las FAN en los alimentos de origen marino y para estudiar el impacto de los cambios ambientales y climáticos en el predominio de las especies de esas floraciones, sus patrones de distribución y la probable frecuencia de los episodios en el futuro.

283. Atendiendo a solicitudes de los Estados Miembros de abordar el impacto de las FAN, el OIEA, por conducto del programa de cooperación técnica, ha desarrollado y fortalecido las capacidades nacionales y regionales en materia de detección de toxinas de las algas en los alimentos de origen marino y gestión de las FAN a fin de promover el suministro sostenible de alimentos de origen marino inocuos.



Fig. G-1. Las toxinas de las floraciones de algas nocivas pueden acumularse en los organismos marinos comestibles como los mejillones o los peces. Productos alimenticios de origen marino destinados al comercio en Chile (izquierda) y un mercado de pescado en Polinesia (derecha).

G.1.2. Reciente validación de un método nuclear para el análisis de las toxinas de las algas

284. El análisis de radiorreceptor basado en tecnología nuclear es un método específico y sensible desarrollado para el análisis de las toxinas de las algas asociadas con la intoxicación paralítica por mariscos (PSP), la intoxicación diarreica por mariscos (DSP), la intoxicación neurotóxica por mariscos

(NSP) y la intoxicación por ciguatera en pescados⁵¹. El análisis de radiorreceptor se basa en la capacidad de una toxina de un extracto de muestra de competir con una biotoxina radiomarcada con tritio 3 (p. ej., saxitoxina con tritio 3 o brevetoxina con tritio 3) para unirse a sus proteínas de referencia farmacológica (es decir, los receptores). La cuantificación de la unión se puede efectuar utilizando un contador de centelleo líquido, que mide la irradiación beta de los radioisótopos, ya sea en viales tradicionales o mediante un lector de microplacas.

285. El análisis de radiorreceptor es una aplicación clave de las tecnologías nucleares que puede eludir los problemas relacionados con el método convencional de uso generalizado para detectar toxinas, que es el bioensayo en ratones. El análisis de radiorreceptor proporciona una estimación de la toxicidad global de una muestra, es muy específico y tiene un límite de detección muy bajo, con lo que esta técnica puede proporcionar a las autoridades reguladoras y los productores importante información de alerta temprana en relación con una FAN.

286. El alto rendimiento del formato de microplaca del análisis de radiorreceptor (figura G-2) reduce al mínimo la utilización de reactivos y la producción de desechos radiactivos. Para este método se utiliza material radiactivo en cantidades exentas (p. ej., toxina radiomarcada con tritio 3, aproximadamente 5-37 kBq por placa) y que se consideran seguras para el transporte, los programas de protección radiológica en laboratorios y la disposición final de desechos. Las instrucciones sobre la utilización del análisis de radiorreceptor son fáciles de seguir y los procedimientos se exponen detalladamente en el documento técnico IAEA-TECDOC-1729⁵². El documento se elaboró en colaboración con la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO como complemento de una publicación de la COI sobre FAN (ICO Manual and Guides N° 59)⁵³.

287. La NOAA, con el apoyo del Organismo, presentó este método ante la AOAC Internacional, que establece los estándares mundiales para la realización de análisis químicos. Ahora el análisis de radiorreceptor está reconocido como método oficial de primera acción de la AOAC para la medición de la PSP en los mariscos⁵⁴. Nueve laboratorios de siete Estados Miembros (Australia, Chile, Estados Unidos de América, Filipinas, Italia, Nueva Zelandia y Tailandia), entre ellos el Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares, un centro colaborador del OIEA, participaron en los ejercicios de comparación entre laboratorios que dieron lugar a ese reconocimiento. En vista de este logro, el Organismo y sus Estados Miembros están desplegando esfuerzos encaminados a desarrollar ejercicios similares entre laboratorios con otras toxinas, como las que causan la intoxicación diarreica por mariscos, la intoxicación neurotóxica por mariscos y la intoxicación por ciguatera en pescados, que pueden detectarse con eficacia y eficiencia mediante el análisis de radiorreceptor.

288. También se están tomando otras medidas a escala nacional e internacional encaminadas a promover la aplicación del análisis de radiorreceptor por los órganos reguladores. Por ejemplo, el análisis de radiorreceptor ha sido presentado al comité de examen de métodos de laboratorio de la Conferencia Interestatal sobre las Condiciones de Salubridad de los Mariscos estadounidense, que

⁵¹ OIEA, "The Radioligand-Receptor Binding Assay: A manual of method", OIEA, Viena (en preparación); BOTTEIN DECHRAOUI M.Y., TIEDEKEN J., PERSAD R., et al., "Use of two detection methods to discriminate ciguatoxins from brevetoxins: application to great barracuda from Florida Keys", *Toxicon*, 46 (2005), 261-70.

⁵² OIEA, "The Radioligand-Receptor Binding Assay: A manual of method", OIEA, Viena (en preparación).

⁵³ REGUERA B., ALONSO R., MOREIRA A., MENDEZ S., Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas, Comisión Oceanográfica Intergubernamental (2011).

⁵⁴ VAN DOLAH F.M., FIRE S.E., LEIGHFIELD T.A., MIKULSKI C.M., DOUCETTE G.J., "Determination of paralytic shellfish toxins in shellfish by receptor binding assay: collaborative study", *Journal of AOAC International*, 95 (2012), 795-812.

promueve el saneamiento de los mariscos a través de la cooperación de los organismos de control estatales y federales, la industria del marisco y la comunidad académica. En el marco del Programa Nacional de Condiciones de Salubridad de los Mariscos de los Estados Unidos actualmente se estudia la posibilidad de considerarlo como un método aprobado de uso limitado. Además, siguiendo la recomendación del comité asesor del OIEA sobre FAN relacionado con el proyecto de cooperación técnica interregional INT7017, se está estudiando la posibilidad de hacer un ensayo de aptitud conforme a la normativa de la Unión Europea por conducto del Laboratorio de Referencia de la Unión Europea de Biotoxinas Marinas.

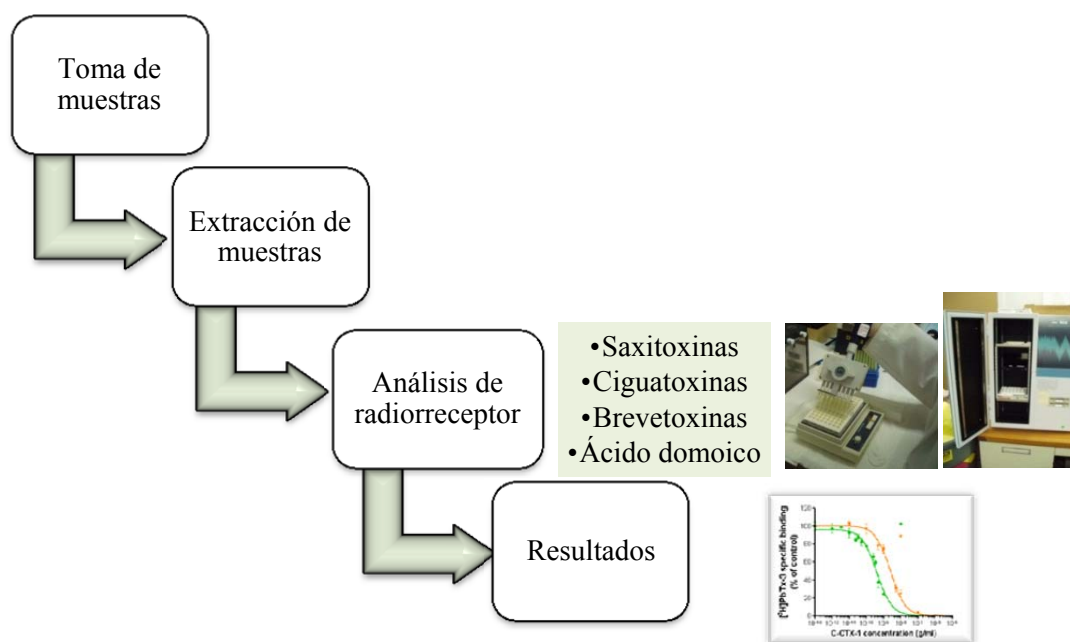


Fig. G-2. Las muestras de alimentos de origen marino se someten a un procedimiento químico de extracción y, por medio del análisis de unión de radioligando, se comprueba su nivel de toxinas (tomado de Reguera et al, 2013).⁵⁵

G.2. Tecnologías nucleares para el estudio de las floraciones de algas nocivas en relación con los cambios ambientales y climáticos pasados y presentes

289. El crecimiento, la toxicidad y la distribución geográfica de las especies de FAN se ven afectados por los cambios climáticos y ambientales a escala local y mundial. El enriquecimiento excesivo en nutrientes, también llamado eutrofización, de las aguas costeras y continentales es una consecuencia directa de la producción de alimentos y de energía para una población humana creciente, y de la consiguiente producción de desechos y aguas negras. La deposición atmosférica de nitrógeno (en forma de óxido de nitrógeno en la lluvia ácida) es otra fuente de enriquecimiento excesivo en nutrientes.

⁵⁵ REGUERA B., BOISSON F., DARIUS H.T., DECHRAOUI BOTTEIN M.Y. "Toxic microalgal blooms: What can nuclear techniques provide for their management?", Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies: Proceedings of the International Symposium Held in Monaco, 27 March–1 April 2011, OIEA, Viena (2011), 483–91.

290. El exceso de nutrientes orgánicos y/o la alteración en la relación de nutrientes en los ecosistemas marinos suelen comportar un aumento de la biomasa de algas en las masas de agua, y se han correlacionado con un gran número de floraciones de cianobacterias y dinoflagelados.⁵⁶ La eutrofización se considera hoy uno de los mayores problemas de contaminación a escala mundial.⁵⁷ En este contexto, se pueden utilizar los radionucleidos y los isótopos estables para conocer mejor los ciclos del carbono y del nitrógeno y, de forma más general, la influencia de las actividades antropogénicas en lugares donde se dan las FAN.

291. Algunos de los dinoflagelados productores de toxinas más nocivos (como el *Gymnodinium* y el *Pyrodinium*) pueden producir quistes que quedan enterrados en los sedimentos marinos. En esta fase de reposo pueden fosilizarse. Es posible emplear técnicas nucleares para obtener información valiosa de los testigos de sedimentos que contienen estos fósiles a fin de mostrar los efectos de los cambios ambientales y climáticos en el predominio y la distribución de estas especies de FAN. Entre estas técnicas figuran la determinación de las tasas de sedimentación y la datación de sedimentos a partir de plomo 210 y polonio 210. También es posible reconstruir las condiciones paleoclimatológicas utilizando, en este caso, razones isotópicas estables como variables, lo que permite conocer mejor las condiciones ambientales reinantes cuando se formaron los quistes.

292. Entre los instrumentos que utilizan isótopos estables cabe citar, por ejemplo, la determinación de las razones de carbono 12/carbono 13, oxígeno 16/oxígeno 18 o nitrógeno 14/nitrógeno 15. Esta última se suele utilizar como registrador de los cambios en la productividad y de los niveles de nutrientes en la columna de agua, y para determinar el origen de los compuestos de nitrógeno. La relación entre estos factores y la incidencia y abundancia de quistes en los sedimentos contribuyen a entender la función que desempeñan los parámetros abióticos en la aparición de las floraciones de algas nocivas.

293. Si bien no se dispone de estos tipos de conjuntos de datos con frecuencia, son fundamentales para determinar si alguna especie de FAN se ha introducido recientemente en una zona nueva, y si está aumentando la frecuencia, intensidad y extensión geográfica de sus floraciones o simplemente se trata de un proceso de fluctuación decenal. Esta información es importante para conocer y prever los episodios de FAN, utilizar los instrumentos analíticos apropiados para detectar toxinas con eficacia y eficiencia en una fase temprana y adaptar estrategias para la gestión de los servicios de los ecosistemas y la inocuidad de los alimentos marinos.

294. En el decenio anterior, el cambio climático y la eutrofización también se asociaron a la creciente toxicidad de las FAN en hábitats de agua dulce como lagos y estuarios. Las algas se dan de forma natural en el agua dulce, donde, en condiciones propicias, se pueden multiplicar tan rápido como sus equivalentes marinos. Entre las especies de algas de agua dulce que se pueden encontrar en lagos o estuarios, las cianobacterias producen potentes toxinas que suponen una amenaza para los organismos acuáticos, la salud del ecosistema y la inocuidad del agua potable para el ganado y los seres humanos. Ha habido casos en que estas toxinas han provocado la muerte de cientos de cabezas de ganado a la vez. Se han observado géneros de cianobacteria que producen saxitoxina en muchos lagos de todo el mundo, y se han detectado niveles bajos de esta toxina en el agua tomada para los procesos de tratamiento y durante esos procesos en Nueva Zelandia.⁵⁸ Como en el caso de las toxinas de las FAN

⁵⁶ ANDERSON, D.M., GLIBERT, P.M., BURKHOLDER, J.M., “Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences”, *Estuaries and Coasts*, 25 (2002), 704–26.

⁵⁷ HOWARTH, R.W., RAMAKRISHNA, K., CHOI, E., et al., “Nutrient Management, Responses Assessment”, *Ecosystems and Human Well-being*, Island Press, Washington, DC (2005), 295–311.

⁵⁸ KOUZMINOV, A., RUCK, J., WOOD, S.A., “New Zealand risk management approach for toxic cyanobacteria in drinking water”, *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 31 (2007), 275–81.

marinas, el análisis de radiorreceptor parece ser un instrumento prometedor que podría adaptarse con facilidad para controlar las toxinas de estas floraciones en agua dulce. Se trata, pues, de un posible ámbito de aplicación de este tipo de análisis para el futuro.



Fig. G-3. Animales acuáticos y terrestres envenenados por FAN en agua dulce. (Fotografías por cortesía de la Woods Hole Oceanographic Institution, Estados Unidos).

G.3. Conclusiones

295. Se prevé que en el futuro aumente la gravedad de los efectos de las FAN en los ecosistemas marinos y en las fuentes vitales de alimentos que constituyen. Estos efectos se dejarán sentir en particular en los países en desarrollo, entre los que figurarán una serie de pequeños Estados insulares en desarrollo que dependen en gran medida de los alimentos de origen marino como fuente principal de proteínas. Las técnicas nucleares como el análisis de radiorreceptor son medios de eficacia demostrada para controlar con eficiencia las toxinas de las algas en alimentos de origen marino y en el medio ambiente, y para mejorar el conocimiento sobre los efectos de la variabilidad del clima en las FAN y en el ecosistema marino.

296. Los enfoques regionales e interregionales son esenciales para abordar el carácter transfronterizo de este importante desafío que afecta al medio ambiente, la salud pública y el bienestar socioeconómico, y para intensificar la cooperación multinacional necesaria para mejorar la eficiencia de la gestión de las FAN en el contexto de los cambios climáticos y ambientales a escala mundial. El OIEA, junto con la COI y el PNUMA en el marco de la Alianza Mundial sobre la Gestión de los Nutrientes, del programa de la COI de Ecología y oceanografía mundiales de las floraciones de algas nocivas, y el Panel Intergubernamental sobre Floraciones de Algas Nocivas de la COI, está trabajando para crear un sistema de alerta temprana y mejorar las previsiones y evaluaciones de los efectos de los cambios ambientales a escala mundial en las FAN. Todas estas medidas son fundamentales para asegurar la gestión sostenible de los servicios de los ecosistemas marinos y la inocuidad de los alimentos de origen marino.

297. Ante el creciente interés expresado por los Estados Miembros en mitigar y gestionar los episodios de FAN y sus repercusiones, el Organismo ha ampliado y agilizado sus actividades destinadas a abordar los efectos de estas floraciones en el medio ambiente y en la inocuidad de los alimentos de origen marino. Se ha transferido tecnología y conocimientos sobre el análisis de radiorreceptor a varios Estados Miembros de regiones de América Latina, Asia y el Pacífico y África, medidas que se intensificarán en los próximos años.