

## Sexagésima reunión ordinaria

# Examen de la Tecnología Nuclear de 2016

*Informe del Director General*

## Resumen

- En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio Examen de la Tecnología Nuclear. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en el que se destacan las novedades importantes ocurridas en 2015.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2016* trata sobre los siguientes temas seleccionados: las aplicaciones eléctricas, la fisión avanzada y la fusión, las aplicaciones de aceleradores y reactores de investigación, las técnicas nucleares en la industria, la imagenología del cuerpo en la salud humana, los avances en el control de enfermedades transmitidas por los insectos, y la gestión de suelos.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, las observaciones específicas de la Junta de Gobernadores y otras observaciones recibidas de los Estados Miembros.



# Examen de la Tecnología Nuclear de 2016

*Informe del Director General*

## Resumen ejecutivo

1. Con 441 reactores en funcionamiento al final de 2015, la energía nuclear tenía una capacidad de generación mundial de 382,9 GW(e). Cinco reactores se pusieron en régimen de parada permanente, 10 fueron conectados a la red, la cifra más alta desde 1990, y se comenzaron a construir 8 reactores. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia, especialmente en China. De los 68 reactores en construcción, 45 estaban en Asia, al igual que 39 de los 45 reactores que se conectaron a la red desde 2005.
2. Treinta países utilizan actualmente la energía nucleoelectrica y un número similar está estudiando o planificando incluirla en su canasta de energía, o está trabajando ya en ello. De los 30 países que tienen centrales nucleares en funcionamiento, 13 están construyendo nuevas plantas o ultimando proyectos de construcción que se habían suspendido, y 12 están planificando la construcción de nuevas plantas o la terminación de proyectos de construcción suspendidos. Las proyecciones de 2015 del Organismo para 2030 muestran un aumento de la capacidad nuclear del 2 % aproximadamente en la proyección baja y de alrededor del 70 % en la alta. Cada vez se reconoce más el papel de la energía nucleoelectrica en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este tipo de energía, que ya ha contribuido considerablemente a mitigar el cambio climático evitando casi 2000 millones de toneladas de dióxido de carbono cada año, puede hacer una aportación directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.
3. Se siguieron adoptando medidas para mejorar la seguridad de las centrales nucleares en todo el mundo. El Organismo publicó su informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi. En una conferencia diplomática, las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear aprobaron la Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear, que comprendía varios principios para la prevención de los accidentes con consecuencias radiológicas y la mitigación de esas consecuencias en caso de que se den.
4. La capacidad mundial anual de enriquecimiento se mantuvo por encima de la demanda total, con niveles relativamente constantes en otras actividades del ciclo del combustible. En agosto de 2015, con la firma del Acuerdo con el Estado Anfitrión y los acuerdos técnicos conexos con Kazajstán, ha quedado ultimado el marco jurídico básico necesario para el establecimiento del banco de uranio poco enriquecido (UPE) del Organismo.
5. El combustible gastado almacenado procedente de reactores nucleares ascendía a unas 266 000 toneladas de metal pesado, y se está acumulando a razón de unas 7000 toneladas anuales. Se siguió reprocesando combustible gastado de reactores comerciales en 10 instalaciones de 5 Estados Miembros.
6. En los próximos años se prevé una cantidad importante de actividades de clausura: 157 reactores nucleares de potencia del mundo están en régimen de parada definitiva o en fase de clausura. Más del 56 % de todos los reactores que están en funcionamiento tienen más de 30 años, y alrededor del 15 % de ellos se construyeron hace más de 40 años. Si bien algunos pueden seguir en funcionamiento más

tiempo, muchos serán retirados del servicio en los próximos 20 años. Además, más de 480 reactores de investigación y conjuntos críticos, y varios centenares de otras instalaciones del ciclo del combustible, han sido clausurados o están en proceso de clausura.

7. Se concedió la primera licencia de construcción de una instalación de disposición final geológica profunda para combustible nuclear gastado a la instalación Onkalo en Finlandia. En todo el mundo hay en funcionamiento instalaciones de disposición final para todas las demás categorías de desechos radiactivos. 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, el reciclado, la repatriación o la disposición final en pozos barrenados especiales, se están considerando seriamente en varios países. Gracias a las operaciones de retirada realizadas en 2015 se pudieron almacenar muchas de esas fuentes en condiciones adecuadas.

8. Varios Estados Miembros siguieron realizando investigaciones sobre los reactores de fisión avanzados, su desarrollo o su despliegue. Va en aumento el interés a escala mundial en el desarrollo y el despliegue de reactores rápidos. También existe un interés cada vez mayor en los reactores pequeños y medianos o reactores modulares debido a la necesidad de generar electricidad de forma flexible, mejorar el comportamiento de la seguridad mediante características de seguridad pasiva, y ofrecer mayor asequibilidad económica. Existen unos 50 diseños y conceptos de este tipo de reactores y tres están en construcción.

9. El uso de la energía nuclear para aplicaciones no eléctricas, como la desalación de agua de mar, la producción de hidrógeno, la calefacción urbana, la recuperación mejorada de petróleo y otras aplicaciones industriales revisten gran interés para varios Estados Miembros.

10. Los esfuerzos destinados a obtener energía a partir de la fusión nuclear, el gran desafío tecnológico del siglo XXI siguen su curso con el avance de las obras de construcción en el emplazamiento del Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER).

11. Existe una creciente demanda de aceleradores de protones de alta energía o de aceleradores de haces de iones en esferas como la física de partículas, la física nuclear y la física de neutrones, y en la transmutación de desechos nucleares de período largo.

12. Aproximadamente la mitad de los 246 reactores de investigación e instalaciones críticas en funcionamiento en 55 países tienen más de 40 años. Los principales desafíos para la comunidad que utiliza esos reactores son la gestión del envejecimiento, la sostenibilidad del suministro de combustible, las opciones relativas a la gestión del combustible gastado y la mejora en la utilización de los reactores de investigación. El objetivo de iniciativas como el Reactor-Laboratorio por Internet, el Centro Internacional basado en Reactores de Investigación designado por el OIEA, así como redes y coaliciones regionales es fomentar la cooperación internacional en la creación de capacidad, comprendida la enseñanza y capacitación. Ocho países están construyendo nuevos reactores de investigación, mientras que varios otros están planificando la construcción de reactores nuevos, o contemplan la posibilidad de hacerlo, en cuanto instalaciones nacionales clave para el desarrollo de infraestructura y programas de ciencia y tecnología nucleares, incluida la energía nucleoelectrónica.

13. Prosiguieron las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME), entre ellas la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país de origen. A lo largo de los años, los programas de devolución del combustible de UME de origen ruso y estadounidense han logrado resultados encomiables. Con la adición de Uzbekistán, actualmente son 28 los países<sup>1</sup> que tenían UME y ya no lo tienen.

---

<sup>1</sup> Más Taiwán (China).

14. Aunque no hubo escaseces importantes del isótopo de uso médico molibdeno 99 durante 2015, las dificultades operativas en las instalaciones de procesamiento y los reactores de investigación más antiguos no se han resuelto. Gracias a algunos cambios en la demanda, el aumento de la eficiencia y la diversificación del suministro, la industria gestionó bien las pequeñas interrupciones del servicio no previstas.

15. Las técnicas nucleares se utilizan ampliamente en los procesos industriales para investigar fenómenos físicos y químicos complejos, como el desgaste, la transferencia de masa, la corrosión y la erosión. Cuando las superficies no son fácilmente accesibles o están ocultas por estructuras superpuestas, la técnica nuclear de la activación en capa fina constituye un medio efectivo de medición y vigilancia del desgaste y la corrosión. La activación en capa ultrafina permite alcanzar una sensibilidad de medición de pérdida de superficies de unos nanómetros.

16. Se prevé utilizar nuevos productos tratados con radiaciones, como materiales de escala nanométrica y diversas formas y tamaños (nanopartículas, nanofibras, nanoporos) sintetizados mediante radiación, para la elaboración de envases activos para alimentos y de materiales de vendaje, así como en sistemas de administración de fármacos. Se están desarrollando envases “activos”, o “inteligentes”, con propiedades superiores de barrera de gases que impiden la entrada de oxígeno y la salida de gases inertes de los envases de los alimentos, lo que permite prolongar la vida del producto. Este tipo de películas pueden fabricarse incorporando nanopartículas específicas a la película, que también podría contener enzimas, agentes antibacterianos y otros componentes que ayudasen a controlar la degradación y el deterioro de los alimentos.

17. En la industria de la impresión y el revestimiento, la necesidad de procedimientos que reduzcan la contaminación y eviten la migración de subproductos degradados a bienes de consumo ha sido un factor determinante en la aparición de aceleradores de haces de electrones de baja energía (menos de 300 keV) para la industria del revestimiento. El uso de monómeros y oligómeros curables por radiación en revestimientos, tintas y adhesivos, que polimerizan y reticulan, evitan el empleo de compuestos orgánicos volátiles. El reciente desarrollo de una nueva generación de emisores de haces de electrones muy compactos y fáciles de manejar con un rango de voltaje de aceleración de 80 a 200 kV y anchuras de tratamiento de hasta 60 cm tiene posibilidades de seguir fomentando la utilización de esta tecnología.

18. En el ámbito de la salud, existe un interés considerable en el desarrollo actual de instrumentos de estudio de la composición corporal, ya que las pruebas sugieren que los distintos componentes del cuerpo influyen considerablemente en el riesgo de enfermedades crónicas, la progresión de enfermedades y la respuesta a los tratamientos. Actualmente se utilizan tres modalidades de imagenología para estudiar la composición corporal: la absorciometría de rayos X de energía dual (DXA), la tomografía computarizada cuantitativa (QCT) y la imagenología por resonancia magnética (MRI). La absorciometría de rayos X de energía dual conlleva la obtención de imágenes utilizando dos niveles de energía de rayos X distintos y es una modalidad muy exacta y precisa para medir la densidad mineral ósea, la masa ósea, la masa grasa, la masa magra de tejidos blandos y el porcentaje de grasa.

19. Actualmente se han propuesto sistemas bidimensionales y tridimensionales de exploración de toda la superficie corporal como plataformas innovadoras para el estudio de la composición corporal, ya que son muy accesibles, su costo es reducido y ofrecen una gran cantidad de datos de regiones anatómicas, por lo que son opciones atractivas para el estudio de la composición corporal por regiones anatómicas. Las mediciones obtenidas mediante los escáneres tridimensionales de superficie han demostrado ser muy precisas, mientras que las medidas bidimensionales de la forma del cuerpo se obtienen mediante una cámara digital estándar. Recientemente se ha demostrado cómo se puede obtener el índice de masa grasa y el índice de masa magra a partir de simples imágenes de contorno de todo el cuerpo que se pueden tomar fácilmente con cámaras convencionales como las de teléfonos celulares, lo que hace que las mediciones ópticas bidimensionales de la composición corporal sean muy idóneas para distintas aplicaciones sobre el terreno.

20. El uso integrado de métodos basados en las radiaciones, la genética y los simbioses para gestionar los mosquitos vectores de enfermedades puede ayudar a reducir la carga de morbilidad asociada. Los proyectos piloto están mostrando que la técnica de los insectos estériles (TIE) puede integrarse a otras estrategias de control para eliminar poblaciones de mosquitos. Aunque se precisa la producción en masa para la TIE y para otras intervenciones conexas de eliminación de poblaciones, es esencial que solo se suelten mosquitos macho porque las hembras son las transmisoras de enfermedades. La separación por sexo para eliminar a las hembras de la línea de producción es posible a pequeña escala mediante el dimorfismo sexual y añadiendo dosis de sangre, pero se necesitan cepas de sexaje genético eficaces y robustas para eliminar de forma fácil y segura a las hembras de mosquitos a escala de cría en masa. Se están desplegando esfuerzos por identificar nuevos marcadores morfológicos o condicionales letales para *Anopheles arabiensis*, *Aedes albopictus* y *Ae. aegypti* a fin de desarrollar cepas de sexaje genético eficaces.

21. Junto con la TIE convencional en la que se emplea la radiación, se está evaluando la *Wolbachia*, un género de bacterias simbióticas heredadas por vía materna que abunda en los insectos, como instrumento complementario para eliminar mediante la incompatibilidad citoplasmática (técnica de los insectos incompatibles) importantes poblaciones de mosquitos vectores en determinadas zonas. A falta de cepas de sexaje genético robustas, la propuesta de combinar la TIE con enfoques basados en la *Wolbachia* parece encerrar muchas posibilidades como método efectivo y bioseguro de controlar las poblaciones de mosquitos vectores ya que elimina los riesgos asociados a la suelta de hembras fértiles transmisoras de enfermedades. Un método dinámico de eliminación de poblaciones, que integre la TIE y otras tácticas compatibles en un programa zonal de gestión de plagas de insectos, quizás sea la única forma de gestionar de forma sostenible las poblaciones de mosquitos y, en última instancia, de controlar las muchas enfermedades que transmiten.

22. La degradación del suelo causada por prácticas de gestión agrícola inapropiadas acarrea la pérdida de suelo fértil y un bajo rendimiento de los cultivos. La pérdida de tierras cultivables, junto con la sedimentación y la contaminación de los arroyos y lagos, es también una importante amenaza ambiental, social y económica. Hasta 1400 millones de personas pueden verse afectadas por la degradación de la tierra, mientras que las pérdidas de los servicios de los ecosistemas se han estimado en 10,6 billones de dólares anuales.

23. Las estrategias que ayudan a evaluar la erosión del suelo y cuantificar la eficacia de su conservación se rigen desde hace tiempo por el uso de radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva (FNR) como el cesio 137, originado a partir de los ensayos de armas termonucleares del pasado, y radioisótopos geogénicos naturales como el plomo 210 y cosmogénicos naturales como el berilio 7. Una técnica forense de isótopos estables desarrollada recientemente, que se basa en la firma de isótopos estables de compuestos específicos (CSSI) presente en los biomarcadores orgánicos inherentes al suelo, permite discriminar e identificar las fuentes de los sedimentos. Estableciendo relaciones entre las huellas de CSSI sobre el origen de los sedimentos y la información de los FRN sobre la redistribución del suelo y los sedimentos, los investigadores obtienen un método exacto y potente para determinar el origen de los sedimentos e identificar las zonas propensas a la erosión del suelo. El uso de estos métodos isotópicos integrados podría permitir que las comunidades agrícolas adoptaran medidas de mitigación específicas y eficaces para reducir al mínimo la pérdida de fertilidad del suelo, la productividad de los cultivos y el deterioro de la calidad del agua.

# Examen de la Tecnología Nuclear de 2016

## Informe principal

### A. Aplicaciones eléctricas

#### A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. Al 31 de diciembre de 2015, había 441 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 382,9 GW(e)<sup>2</sup> (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa un aumento en torno a los 6,6 GW(e) de la capacidad total con respecto a 2014.
2. De los reactores en funcionamiento, el 81,6 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, el 11,1 % son reactores moderados y refrigerados por agua pesada, el 3,4 % son reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito, y el 3,2 % son reactores refrigerados por gas. Dos son reactores rápidos refrigerados por metal líquido.
3. El 10 de septiembre de 2015, Sendai-1 pasó a ser el primer reactor nuclear de potencia desde el accidente de Fukushima Daiichi en reanudar su actividad a pleno funcionamiento en el Japón, al que siguió Sendai-2 el 15 de octubre de 2015. La Autoridad Reguladora Nuclear del Japón aprobó el re arranque de Ikata-3 en mayo de 2015, que también fue aprobado por la Asamblea de la Prefectura de Ehime en octubre de 2015.
4. En 2015 se declaró la parada permanente de cinco unidades de reactor en el Japón (Genkai-1, Mihama-1 y 2, Shimane-2 y Tsuruga-1), del reactor de Grafenrheinfeld en Alemania y del reactor Wylfa-1 en el Reino Unido.
5. En 2015 se conectaron a la red diez nuevos reactores, la cifra más alta desde 1990. Ocho de ellos (Changjiang-1, Fangchenggang-1, Fangjiashan-2, Fuqing-2, Hongyanhe-3, Ningde3, y Yangjiang-2 y 3) se encuentran en China, uno (Shin-Wolsong-2) en la República de Corea y uno (Beloyarsk-4) en la Federación de Rusia.
6. En 2015 se iniciaron ocho construcciones: Fangchenggang-3, Fuqing-5 y 6, Hongyanhe-5 y 6, y Tianwan-5 en China; K-2 en el Pakistán, y Barakah-4 en los Emiratos Árabes Unidos.
7. Al 31 de diciembre de 2015, había 68 reactores en construcción. La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen centradas en Asia (fig. A-1), especialmente en China. Del número total de reactores en construcción, 45 están en Asia, al igual que 39 de los 45 reactores nuevos conectados a la red desde 2005.

---

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

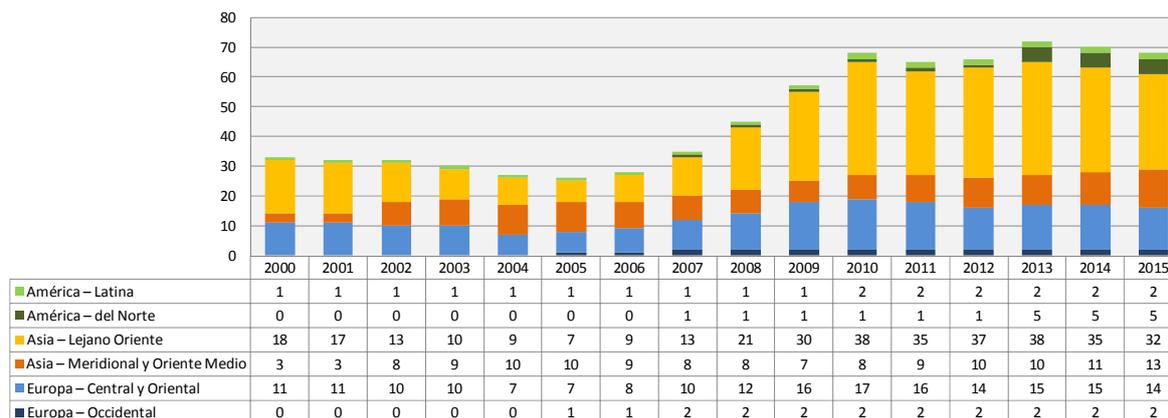


Fig. A-1. Número de reactores en construcción, por región. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia <http://www.iaea.org/pris>)

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2015)<sup>a</sup>

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2015		Experiencia operacional total hasta 2015	
	Nº de unidades	MW(e) totales	Nº de unidades	MW(e) totales	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	8	10 799			86,8	14,1	816	7
ARGENTINA	3	1 632	1	25	6,5	4,8	76	2
ARMENIA	1	375			2,6	34,5	41	8
BELARÚS			2	2 218				
BÉLGICA	7	5 913			24,8	37,5	275	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	13,9	2,8	49	3
BULGARIA	2	1 926			14,7	31,3	159	3
CANADÁ	19	13 524			95,6	16,6	693	6
CHINA	31	26 774	24	24 128	161,2	3,0	209	2
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS			4	5 380				
ESLOVAQUIA	4	1 814	2	880	14,1	55,9	156	7
ESLOVENIA	1	688			5,4	38,0	34	3
ESPAÑA	7	7 121			54,8	20,3	315	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	99	99 185	5	5 633	798,0	19,5	4 111	4
FEDERACIÓN DE RUSIA	35	25 443	8	6 582	182,8	18,6	1 191	4
FINLANDIA	4	2 752	1	1 600	22,3	33,7	147	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	419,0	76,3	2 048	4
HUNGRÍA	4	1 889			15,0	52,7	122	2
INDIA	21	5 308	6	3 907	34,6	3,5	439	6
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA	1	915			3,2	1,3	4	4
JAPÓN	43	40 290	2	2 650	4,3	0,5	1 739	0
MÉXICO	2	1 440			11,2	6,8	47	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,9	3,7	71	0
PAKISTÁN	3	690	3	1 644	4,3	4,4	64	8

REINO UNIDO	15	8 918			63,9	18,9	1 559	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 930			25,3	32,5	146	10
REPÚBLICA DE COREA	24	21 733	4	5 420	157,2	31,7	474	0
RUMANIA	2	1 300			10,7	17,3	27	11
SUDÁFRICA	2	1 860			11,0	4,7	62	3
SUECIA	10	9 648			54,5	34,3	432	6
SUIZA	5	3 333			22,2	33,5	204	11
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	82,4	56,5	458	6
Total <sup>b, c</sup>	441	382 855	68	67 442	2 441,3		16 536	7

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

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

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

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

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

8. De los 441 reactores nucleares de potencia en funcionamiento, 250 llevan 30 años o más en servicio. Cuando un reactor alcanza el final de su vida de diseño, es sometido a un examen de la seguridad y a un análisis del envejecimiento de sus sistemas, componentes y estructuras esenciales a fin de validar o renovar su licencia de explotación para plazos que rebasan el período de servicio previsto inicialmente.

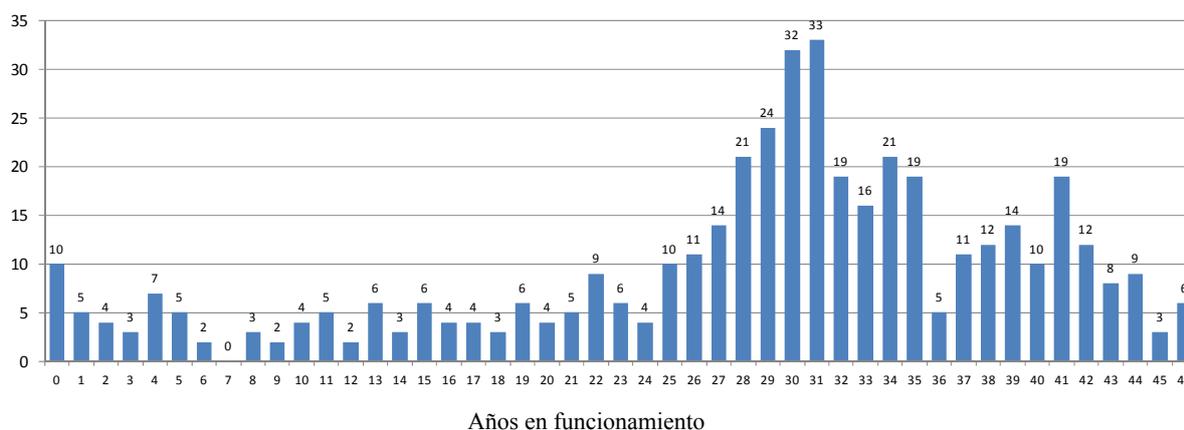


Fig. A-2. Distribución de los reactores de potencia en funcionamiento según su antigüedad, a diciembre de 2015. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia <http://www.iaea.org/pris>)

9. En los Emiratos Árabes Unidos, la Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos presentó en marzo una solicitud de licencia de explotación en nombre de Nawah, que será la entidad explotadora y la titular de la licencia de Barakah-1. Se prevé que la Autoridad Federal de Reglamentación Nuclear emita una licencia de explotación en octubre de 2016 para permitir la carga de combustible y la puesta en servicio en caliente de Barakah-1. Las unidades 2, 3 y 4 de Barakah ya están en construcción y se prevé que entren en funcionamiento en 2018, 2019 y 2020 respectivamente. En 2015, el Organismo organizó una misión del Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria en febrero, una misión de Examen de Medidas de Preparación para Emergencias en marzo y una misión del Servicio Internacional de Asesoramiento sobre Protección Física en mayo.

10. Las obras de construcción de las dos unidades de la primera central nuclear de Belarús continuaron su curso. La puesta en servicio de Ostrovets-1 y 2 está prevista para 2018 y 2020 respectivamente.

11. Turquía sigue desarrollando la infraestructura para su programa nucleoelectrico y ha estado ultimando un proyecto de ley en materia de energía nuclear, en el que se abordan de manera exhaustiva cuestiones de seguridad tecnológica, seguridad física y salvaguardias.

12. Bangladesh determinó que Rooppur Nuclear Power Plant Company sería la futura entidad explotadora y entabló negociaciones con la Federación de Rusia en relación con un contrato de crédito y un contrato general de ingeniería y construcción. Polonia, que tiene en mira seleccionar la tecnología y el emplazamiento de su primera central nuclear para 2019, comenzar su construcción en 2022 a más tardar, y tener su primera unidad en funcionamiento para 2029, preparó documentos de licitación y celebró negociaciones en relación con un mecanismo de apoyo gubernamental cuya adopción está prevista para 2018. Viet Nam ejecutó varios proyectos nacionales de desarrollo de los recursos humanos y de divulgación al público, y continuó revisando su Ley de Energía Atómica, que se prevé que sea presentada para su aprobación en 2016.

13. Las misiones de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear enviadas a Nigeria (junio), Kenya (agosto) y Marruecos (octubre) reconocieron los avances que estos países habían conseguido en el desarrollo de su infraestructura nuclear y recomendaron nuevas medidas. En junio de 2015, Jordania firmó contratos con Atomstroyexport, de la Federación de Rusia, para realizar un estudio sobre el suministro de agua y llevar a cabo actividades de supervisión de emplazamientos. En octubre se constituyó la Compañía de Energía Nucleoelectrica de Jordania. Se encuentran en proceso de evaluación técnica varias propuestas para un estudio de la red eléctrica, para un estudio sobre el mercado de la electricidad y para servicios de consultoría técnica, jurídica y financiera en relación con el desarrollo de proyectos. Egipto suscribió en noviembre un acuerdo con la Corporación Estatal de Energía Atómica "Rosatom" para la construcción de cuatro reactores.

14. En muchos países que están considerando adoptar la energía nucleoelectrica, el interés se centra en tomar una decisión fundamentada, en crear la amplia infraestructura jurídica y de reglamentación necesaria para un programa nucleoelectrico y en formar a los recursos humanos que se precisan.

15. La participación de las partes interesadas sigue siendo una importante esfera de interés para los países, independientemente de la etapa de desarrollo de la infraestructura nuclear en la que se encuentren, dado que contribuye a que los Estados Miembros aborden las preocupaciones en una fase temprana y expongan la justificación, los planes y los avances de su programa de energía nucleoelectrica. En 2015, el Organismo facilitó misiones de expertos relacionadas con la participación de las partes interesadas en la Arabia Saudita, Egipto, Indonesia y Kenya, así como reuniones internacionales en Finlandia y el Japón.

#### **A.1.1. Países en fase de ampliación**

16. La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC) ha expedido una licencia de explotación por 40 años a la Autoridad del Valle del Tennessee para explotar la unidad 2 de Watts Bar hasta octubre de 2055. El emplazamiento de Watts Bar es el primero en cumplir con las órdenes relativas a las estrategias de mitigación de accidentes de la NRC derivadas del accidente de Fukushima.

17. El reactor europeo de agua a presión Flamanville-3 en Francia está en curso de construcción y la terminación y la conexión a la red están previstas para fines de 2018. Atendiendo a una solicitud de la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia, se están efectuando una serie de pruebas para confirmar que las características metalúrgicas y mecánicas de la tapa y el fondo de la vasija de presión cumplen los requisitos.

18. Nucleoelectrica Argentina y la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) han concluido sus negociaciones sobre los contratos técnicos y comerciales para la construcción del cuarto reactor de

la Argentina, Atucha 3, de tipo CANDU, cuya construcción demorará ocho años. Con arreglo a un acuerdo marco entre estas dos organizaciones, también está prevista la construcción de un reactor de agua a presión (PWR) Hualong-One de diseño chino como quinta unidad de la Argentina.

19. En Finlandia, Fennovoima presentó una solicitud de licencia de construcción al Ministerio de Empleo y Economía para su proyecto Hanhikivi. Se prevé que la tramitación de dicha solicitud tarde al menos dos años. Fennovoima aspira a comenzar a construir en 2018 la central basada en el reactor de potencia refrigerado y moderado por agua de 1200 MW(e) de diseño ruso (WWER-1200), y que su explotación comience en 2024.

### **A.1.2. Países con centrales nucleares en funcionamiento**

20. Las decisiones sobre la vida operacional dependen sobre todo de las condiciones del mercado eléctrico y de las predicciones en relación con el desarrollo empresarial, a las que a menudo también se unen factores sociales y políticos. En Suecia se cerrarán cuatro reactores antes de lo que se había previsto inicialmente porque no se consideran rentables. Ringhals-2 entrará en régimen de parada permanente en 2019, seguido de Ringhals-1 en 2020, aunque inicialmente se había previsto que la parada de ambos tuviera lugar en torno a 2025. Se tomará una decisión final con respecto a la fecha de parada de Oskarshamn-1 en cuanto esté disponible un calendario para la clausura. Oskarshamn-2, que está fuera de servicio desde junio de 2013 a raíz de un amplio programa de modernización, no será rearrancado.

21. En los Estados Unidos de América, Entergy cerrará su central nuclear Pilgrim de una sola unidad, situada en Massachusetts, a más tardar en junio de 2019. También tiene previsto que su central nuclear FitzPatrick, ubicada en Nueva York, entre en régimen de parada a finales de 2016 o comienzos de 2017, aduciendo como motivo su decreciente viabilidad económica.

22. Se aprobó que el reactor en funcionamiento más antiguo de la República de Corea, Kori-1, en funcionamiento desde 1978 y renovado en 2007, siga activo hasta 2017. Dado que la Compañía Hidroeléctrica y Nucleoeléctrica de Corea anunció que no solicitará ningún proceso para renovar la licencia y prolongar la explotación hasta 2027, Kori-1 será la primera unidad de potencia nuclear del país en alcanzar la fase de clausura cuando entre en régimen de parada en junio de 2017.

### **A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica**

23. Según las proyecciones de 2015 del Organismo (fig. A-3), en la proyección alta se prevé que la capacidad nucleoelectrica mundial de energía nuclear aumente desde su nivel actual de 381,7 GW(e) hasta los 632 GW(e) para 2030, lo que representa un incremento de alrededor del 70 % en 15 años. En la proyección baja, la capacidad nuclear en 2030 será de 385 GW(e), esto es, mantendrá aproximadamente su nivel actual. En estas cifras se toman en consideración las retiradas de servicio: la nueva capacidad efectiva añadida en los próximos 15 años será de cerca de 150 GW(e) en la proyección baja y de 300 GW(e) en la proyección alta. Si estas proyecciones se amplían al futuro, se obtiene como resultado que, para 2050, la capacidad nuclear aumenta hasta los 964 GW(e) en la proyección alta, mientras que en la proyección baja el crecimiento neto es nulo.

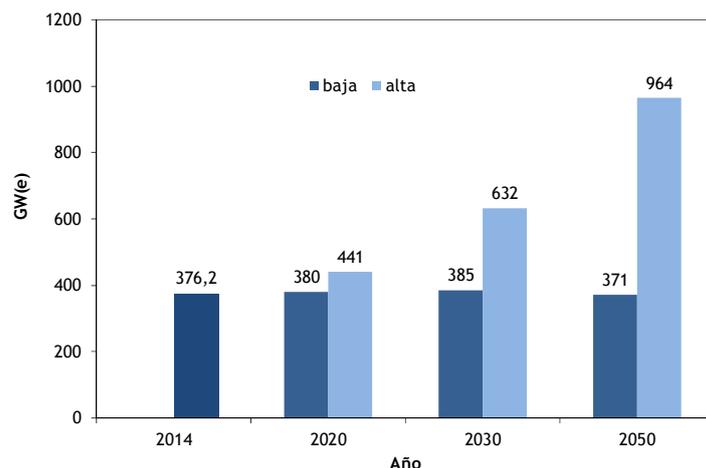


Fig. A-3. Proyecciones de la capacidad nuclear mundial. (Fuente: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Colección de Datos de Referencia del OIEA N° 1, edición de 2015)

24. Las proyecciones altas del OIEA, de la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la OCDE y de la Asociación Nuclear Mundial (WNA) muestran sistemáticamente un crecimiento del orden de 600-700 GW(e) para 2030, mientras que las proyecciones bajas denotan mayores incertidumbres de crecimiento (fig. A-4).

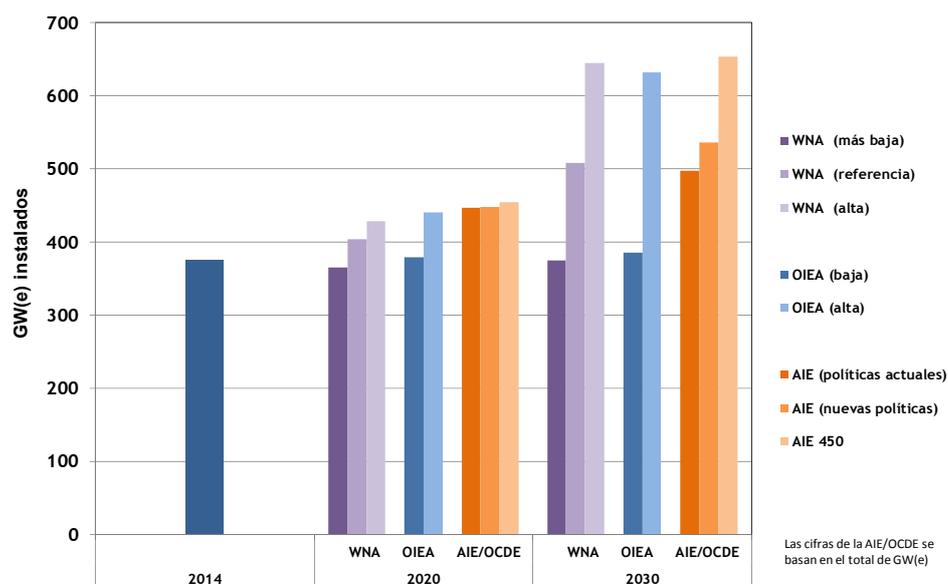


Fig. A-4. Comparación de las proyecciones más recientes del OIEA, los escenarios de la AIE/OCDE de 2014 y las proyecciones de la WNA de 2013.

25. La energía nucleoelectrica ha contribuido notablemente a la mitigación del cambio climático al evitar la emisión anual de unos 2000 millones de toneladas de dióxido de carbono. Para que la energía nucleoelectrica contribuya a limitar el calentamiento global a 2 °C para 2100, su capacidad debería corresponderse con la proyección alta, a fin de evitar hasta 2050 unas emisiones de 6500 millones de toneladas de gases de efecto invernadero, aproximadamente. El 21° período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP 21) tuvo como resultado el Acuerdo de París, en el cual no se señala ni se excluye ninguna forma concreta de energía. Así, los países pueden establecer carteras de energía con baja emisión de carbono para compensar las emisiones de carbono. El Acuerdo de París también respalda el desarrollo sostenible. La energía nucleoelectrica puede contribuir directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible séptimo, “Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos”, y decimotercero, “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”.

## **A.3. Ciclo del combustible**

### **A.3.1. Parte inicial**

#### **Recursos y producción de uranio**

26. Los precios al contado del uranio continuaron a niveles bajos en 2015, oscilando entre los 77 dólares/kilo y los 86 dólares/kilo, en comparación con el mínimo alcanzado a mediados de 2014 de 60 dólares/kilo aproximadamente. Los bajos precios limitaron considerablemente la capacidad de las empresas para recaudar fondos para la ejecución de actividades de prospección, la realización de estudios de viabilidad, la puesta en marcha de nuevos proyectos de construcción y la ampliación de proyectos existentes.

27. La WNA estima que la producción de uranio fue de aproximadamente 57 000 toneladas en 2015, más o menos en torno a los niveles de 2014. En la actualidad se produce uranio en más de 15 países. Hay varios nuevos proyectos en distintas etapas de desarrollo en algunos de los países productores y en más de 25 países que estudian la posibilidad de incorporarse al ámbito nuclear, algunos de los cuales reanudarán la extracción de uranio tras un largo paréntesis.

28. Kazajstán mantuvo su condición de principal productor de uranio del mundo, el cual procede prácticamente en su totalidad de sus minas de lixiviación *in situ*. Tras los rápidos aumentos de la producción registrados entre 2000 y 2012, los incrementos recientes han sido moderados, hasta alcanzar una producción de 23 800 toneladas de uranio en 2015.

29. El segundo mayor productor, el Canadá, continuó recibiendo alentadores resultados de prospección del uranio de la cuenca del Athabasca, por ejemplo, en el depósito de uranio de Triple R, que podría producir una cantidad estimada de 38 770 toneladas durante 14 años de vida de la mina. Cigar Lake, la mina de uranio de más alta calidad del mundo, inició su producción comercial en mayo y prevé alcanzar para 2017 su plena capacidad de producción de 6900 toneladas de uranio anuales.

30. La mina de uranio de reciente construcción de Husab, en Namibia, fue puesta en servicio en 2015 y está previsto que su producción comience en 2016. La capacidad total podría alcanzar las 5770 toneladas de uranio anuales, y su vida probablemente supere los 20 años. Las minas de uranio de Rössing y Langer Heinrich, en Namibia, prosiguieron sus operaciones en 2015.

31. En Australia, la mina de uranio de lixiviación *in situ* de Four Mile, que fue inaugurada en 2014, aumentó su producción hasta alcanzar una capacidad de 1000 toneladas de uranio anuales. En el proyecto Ranger, se suspendieron las obras de una posible ampliación de la extracción subterránea a las dos minas a cielo abierto, que finalmente no proseguirán. La producción durante 2015 fue inferior a 2500 toneladas de uranio, lo que contrasta con las cantidades comprendidas entre 4000 y 6000 toneladas anuales registradas desde 1997 hasta 2009.

32. La primera fase de una refinería piloto para extraer uranio y metales de tierras raras del yacimiento de Kvanefjeld en Groenlandia (Reino de Dinamarca) ha cumplido o superado sus objetivos. Las estimaciones anunciadas en febrero comprenden 228 100 toneladas de uranio y 11,13 millones de toneladas de óxido de tierras raras. Los recursos de uranio no convencionales, como los yacimientos de Kvanefjeld, amplían notablemente la base de recursos. En los Estados Unidos de América se está investigando el agua de mar como otra fuente no convencional de uranio. En el pasado se ha utilizado el torio como combustible nuclear en operaciones de demostración, pero se requerirá todavía un trabajo sustancial antes de que pueda tomarse en consideración para uso comercial. Se estima que ascienden a entre seis y siete millones de toneladas los recursos mundiales de torio.

## **Conversión y enriquecimiento**

33. El Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido explotan plantas a escala comercial de conversión de octóxido de triuranio ( $U_3O_8$ ) a hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ). 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 es de alrededor de 60 000 toneladas de uranio en forma de  $UF_6$  anuales. La demanda total actual de servicios de conversión (suponiendo una concentración de las colas de enriquecimiento del 0,25 % de uranio 235) también es del orden de 60 000 a 64 000 toneladas anuales.

34. La capacidad mundial total de enriquecimiento es actualmente de unos 60 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 50 millones de UTS anuales. Cinco empresas ofrecen servicios comerciales de enriquecimiento: la CNNC (China), AREVA (Francia), la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” (Federación de Rusia), USEC (Estados Unidos de América) y URENCO (Europa y Estados Unidos de América).

35. Hay pequeñas plantas de enriquecimiento y conversión en funcionamiento en la Argentina, el Brasil, la India, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán.

36. La NRC de los Estados Unidos de América ha aprobado una modificación de la licencia que permite a URENCO ampliar su planta de enriquecimiento Eunice en Nuevo México. El plan consiste en ampliar la capacidad de 3,7 millones de UTS actuales hasta 10 millones de UTS. No obstante, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América ha anunciado una reducción de fondos de cerca del 60 % en su programa de enriquecimiento de uranio. Las actividades se limitarán ahora a desarrollar la nueva tecnología de enriquecimiento de uranio “American Centrifuge” en Oak Ridge (Tennessee).

37. La desconversión del  $UF_6$  empobrecido en óxido de uranio o tetrafluoruro de uranio ( $UF_4$ ) permite almacenar el uranio empobrecido a largo plazo en una forma más estable. La capacidad total mundial de desconversión actual se mantuvo en unas 60 000 toneladas de  $UF_6$  anuales. Las principales instalaciones en funcionamiento son la planta de AREVA en Tricastin (Francia), dos plantas de Uranium Disposition Services en Portsmouth y Paducah (Estados Unidos de América), y la planta de desconversión W-ECP de la Planta Electroquímica situada en Zelenogorsk (Federación de Rusia). International Isotopes está construyendo una planta en Nuevo México (Estados Unidos de América). URENCO ChemPlants (Reino Unido) ha retrasado hasta 2017 la fecha prevista de inicio de la planta de desconversión de la instalación de gestión de colas de Capenhurst, que actualmente se encuentra en construcción. Cuando esté terminada, la instalación procesará las existencias europeas de uranio empobrecido de URENCO.

38. El Gobierno del estado de Australia Meridional creó la primera Comisión Real de la nación sobre combustible nuclear, que examina la capacidad potencial de expansión de las actividades del ciclo del combustible.

### **A.3.2. Fabricación de combustible**

39. La demanda anual actual de servicios de fabricación de combustible para reactores de agua ligera (LWR) se mantuvo en unas 7000 toneladas de uranio enriquecido en conjuntos combustibles, pero se prevé que en el futuro a corto plazo aumente hasta las 8000 toneladas de uranio anuales aproximadamente. Las necesidades de los reactores de agua pesada a presión (PHWR) ascendieron a 3000 toneladas de uranio anuales. Ahora hay varios suministradores compitiendo por la mayoría de los tipos de combustibles. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 500 toneladas de uranio anuales (uranio enriquecido) para los LWR y en unas 4000 toneladas de uranio anuales (uranio natural) para los PHWR. Actualmente se fabrica combustible para LWR en

Alemania, el Brasil, China, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón, Kazajstán, el Reino Unido, la República de Corea y Suecia. En el caso de los combustibles de uranio natural para PHWR, el uranio se purifica y se convierte en dióxido de uranio ( $UO_2$ ) en la Argentina, el Canadá, China, la India y Rumania.

40. La NRC de los Estados Unidos de América ha autorizado a la central nuclear de Perry, en Ohio, a comenzar a utilizar el combustible GNF2 para reactores de agua en ebullición (BWR) de alto rendimiento, de Global Nuclear Fuel. Este combustible promete aumentar la cantidad de energía generada a la vez que se reducen los costos generales del ciclo del combustible, con lo que se reduce la cantidad total de uranio y su enriquecimiento medio en las recargas de combustible. La empresa también comenzó a comercializar en 2015 su conjunto combustible GNF3 para BWR (fig. A-5), que permite ahorrar combustible y proporciona un mayor rendimiento y flexibilidad en la explotación. En abril de 2015, AREVA presentó el combustible ATRIUM 11 en dos BWR en los Estados Unidos de América. El nuevo diseño ofrece una mayor flexibilidad operacional, que es particularmente valiosa para las compañías eléctricas que han optado por aumentos de potencia de las centrales o por estrategias de optimización del factor de capacidad.



*Fig. A-5. La nueva generación de combustible GNF3 para BWR. (Fotografía: Global Nuclear Fuel)*

41. La Empresa de Servicios Públicos de Arizona (Estados Unidos de América) ha firmado un contrato con Westinghouse Electric Company para la fabricación y el suministro de su combustible de nueva generación para tres unidades de reactores nucleares en Palo Verde (Arizona). Este nuevo combustible, denominado CE16NGF, incorpora vainas avanzadas y absorbentes consumibles, así como novedades en el diseño estructural que mejoran la eficiencia y la fiabilidad del combustible en tanto que aumenta su vida en servicio.

42. Un grupo de empresas estadounidenses de servicios públicos presentó a la NRC en mayo de 2015 una expresión formal de interés para examinar el diseño del novedoso combustible metálico de Lightbridge. Este combustible está compuesto por una aleación de circonio y uranio y utiliza una composición única con una configuración geométrica de barras polilobuladas y torsadas helicoidalmente. El diseño ofrece propiedades mejoradas de transferencia del calor, lo que le permite funcionar a una mayor densidad de potencia que los combustibles de óxido de uranio que se utilizan en la actualidad. Se prevé que el combustible sea sometido a pruebas de irradiación en el reactor de investigación Halden en Noruega a partir de 2017.

43. Varios laboratorios industriales y universitarios de investigación están estudiando actualmente diversos conceptos de combustibles a prueba de accidentes. En el Japón, Toshiba e IBIDEN han desarrollado una nueva tecnología para la fabricación de componentes del combustible nuclear a partir de carburo de silicio para reemplazar las vainas de zircaloy en los LWR. La cubierta del conjunto combustible será sometida a prueba en un reactor de investigación en 2016, a fin de que para 2025 se pueda llevar a cabo su comercialización. En el Reino Unido, el Laboratorio Nacional Nuclear (NNL) y la Universidad de Manchester pusieron en marcha un proyecto de investigación en el que se llevan a cabo actividades relacionadas con vainas avanzadas de compuestos cerámicos que podrían brindar enormes posibilidades para mejorar las capacidades térmicas del combustible nuclear.

44. En los Países Bajos han finalizado ensayos de irradiación para determinar la adecuación de elementos combustibles para la demostración del reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM), un reactor refrigerado por gas de alta temperatura que se está construyendo en Shidaowan (China). En abril, la República Islámica del Irán anunció la apertura de su primera instalación de producción de combustible nuclear, que producirá combustible similar al utilizado en la central nuclear de Bushehr.

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

46. La India y la Federación de Rusia fabrican combustible MOX para su utilización en reactores rápidos. En la Federación de Rusia, el Complejo Minero y Químico finalizó los preparativos para la comercialización de un lote de conjuntos combustibles estándar con combustible MOX para el reactor Beloyarsk-4, de tipo BN-800. El año pasado concluyó la construcción de las nuevas cadenas de producción, con una capacidad de producción anual de 20 conjuntos combustibles en 2015 y la intención de producir 400 conjuntos por año para 2017. En el Japón se está construyendo la instalación J-MOX, con una capacidad de 130 toneladas de metal pesado por año, cuya explotación comercial se prevé que comience en 2019.

### **A.3.3. Garantía de suministro**

47. La finalización en 2015 del marco jurídico con Kazajstán marcó la transición de los estudios de evaluación y viabilidad del proyecto del Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA a su ejecución plena. El 27 de agosto de 2015, tras su aprobación por la Junta de Gobernadores, se firmaron el Acuerdo con el Estado Anfitrión y dos acuerdos técnicos complementarios en Astana (Kazajstán). El primer acuerdo técnico complementario es el de explotador de la instalación entre el Organismo y la Planta Metalúrgica de Ulba, que se encargará de la operación del Banco de UPE del OIEA. El segundo de estos acuerdos es con el Ministerio de Energía sobre los arreglos concretos que han de aplicarse para establecer el Banco. De conformidad con este acuerdo, se estableció el Comité Conjunto de Coordinación, copresidido por el Organismo y Kazajstán, que acordó un plan de actividades específicas en el período previsto de 90 días posterior a la firma. En virtud del Acuerdo con el Estado Anfitrión, el sistema de reglamentación nuclear de Kazajstán velará por la seguridad tecnológica y la seguridad física, y el plan de actividades específicas suministra una hoja de ruta para demostrar el cumplimiento de las disposiciones aplicables de las normas de seguridad y los documentos de orientación sobre seguridad física del Organismo, de conformidad con lo dispuesto en el Acuerdo con el Estado Anfitrión. Se siguen realizando actividades técnicas importantes en las esferas de la seguridad tecnológica, en particular la seguridad sísmica, y la seguridad física. Se completó un estudio de viabilidad sobre las alternativas de instalaciones de almacenamiento y se está considerando la posibilidad de construir un nuevo edificio. Anteriormente, en junio de 2015, también tras la aprobación por la Junta de Gobernadores, se había firmado un acuerdo de tránsito con la Federación de Rusia.

48. En el *Examen de la tecnología nuclear — 2012* (documento GC(56)/INF/3) se describen otros mecanismos de garantía de suministro en vigor.

### A.3.4. Parte final

49. A fines de 2015, el combustible gastado almacenado ascendía a unas 266 000 toneladas de metal pesado, y se está acumulando a razón de unas 7000 toneladas anuales. Aunque la mayor parte del combustible se almacena en húmedo en el emplazamiento del reactor, existen 147 instalaciones de almacenamiento de combustible gastado fuera de los emplazamientos en 27 países (fig. A-6). El Canadá y los Estados Unidos tienen los mayores inventarios de combustible gastado en sistemas de almacenamiento en seco, en los que cada país almacena más de una tercera parte de su inventario nacional. Alemania tiene más de 1000 cofres metálicos de almacenamiento en seco de doble uso cargados y se prevé que la totalidad de su inventario de combustible gastado estará almacenada en seco a fines de 2022.

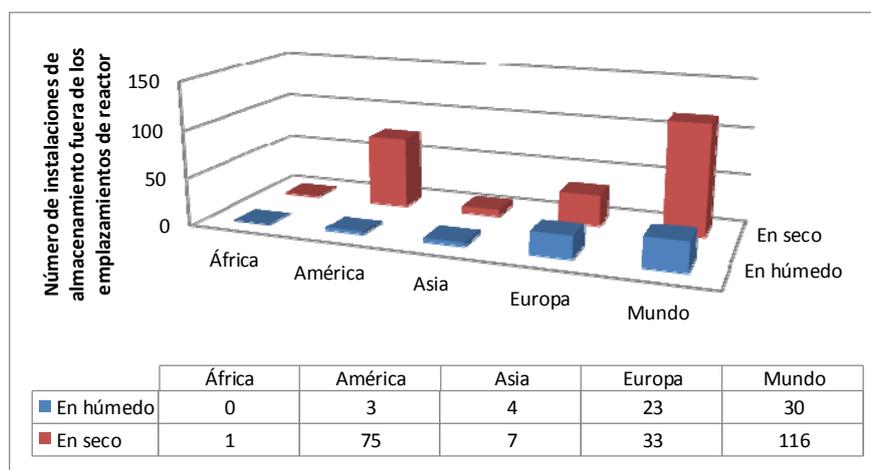


Fig. A-6. Distribución mundial de instalaciones de almacenamiento de combustible gastado fuera de los emplazamientos del reactor.

50. Actualmente, 12 países están planificando, construyendo o poniendo en servicio instalaciones de almacenamiento en seco. Los proyectos más importantes están en España, la Federación de Rusia, el Japón y Ucrania. En Zheleznogorsk (Federación de Rusia), se ha completado recientemente la instalación de almacenamiento en seco con mayor capacidad del mundo con la adición de dos nuevos edificios de cámaras de almacenamiento en seco (uno para el combustible del reactor de alta potencia tipo canal (RBKM) y el otro para el del WWER) al finalizado en 2012. Está previsto que las nuevas cámaras recibirán combustible gastado en 2016.

51. En los Estados Unidos, Waste Control Specialists ha solicitado a la NRC la licencia para explotar una instalación independiente de almacenamiento de combustible gastado en Andrews (Texas). AREVA estará a cargo del diseño, la construcción y la explotación de la instalación propuesta. Holtec International y Eddy-Lea Energy Alliance han anunciado un memorando de entendimiento relativo al diseño y la construcción de una instalación centralizada de almacenamiento de combustible gastado con una capacidad de 75 000 toneladas de metal pesado basada en el sistema de almacenamiento en seco subterráneo de máxima seguridad de Holtec International. En caso de aprobarse, la instalación se construirá en el sudeste de Nuevo México.

52. El panorama global del reprocesamiento de combustible gastado de reactores comerciales no cambió en 2015. Dicho reprocesamiento se llevó a cabo en diez instalaciones ubicadas en China, la Federación de Rusia, Francia, la India y el Reino Unido. Francia y el Reino Unido tienen la mayor capacidad desplegada y reprocesan aproximadamente 1000 toneladas de metal pesado anuales. Francia y la Federación de Rusia ofrecen servicios de reprocesamiento a clientes de otros países. La

instalación Mayak, de la Federación de Rusia, incrementó su capacidad anual de procesamiento a 200 toneladas de metal pesado anuales y ensayó algunas tecnologías de reprocesamiento de combustibles no convencionales, como el combustible de berilio y uranio. La India tiene tres instalaciones para combustibles de reactores de potencia y una instalación piloto de 60 toneladas de metal pesado anuales para el combustible de óxido de torio. China cuenta con una planta de reprocesamiento piloto con capacidad de reprocesar hasta 50 toneladas de metal pesado por año. En noviembre, la CNNC y AREVA firmaron un acuerdo para construir, probablemente en la provincia de Gansu (China), una planta de procesamiento y reciclado de 800 toneladas de metal pesado por año. El inicio de la construcción está previsto en 2020 y su finalización en 2030. El emplazamiento también contendrá una instalación de almacenamiento de combustible gastado con una capacidad de 3000 toneladas de metal pesado. Actualmente, en el Japón no hay plantas de reprocesamiento comerciales; no obstante, la planta de 800 toneladas de metal pesado anuales en Rokkasho está en fase de puesta en servicio activa y de examen de la seguridad, y se prevé que estará en funcionamiento para marzo de 2016.

53. Sobre la base de la “Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las Unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO”, de junio de 2013, la retirada del combustible en la piscina de almacenamiento en la Unidad 3 de la central nuclear de Fukushima Daiichi estaba prevista para el primer trimestre de 2015. Varios problemas impidieron el cumplimiento de este objetivo, incluidas dificultades relativas a la retirada de la consola de la máquina de manipulación del combustible (realizada en agosto de 2015) y de maquinaria conexas, y la capacidad de descontaminar el piso de recarga de la Unidad 3 al nivel de dosis de 1 mSv/h tomado como objetivo. En junio de 2015 se revisó la Hoja de ruta para reflejar la situación sobre el terreno. Como resultado de ello se reprogramó la retirada del combustible de las piscinas de almacenamiento de las Unidades 1 y 3 a 2020 y 2017, respectivamente.

### **A.3.5. Clausura, restauración ambiental y gestión de los desechos radiactivos**

#### **Clausura de instalaciones nucleares**

54. Además de los 441 reactores nucleares de potencia en explotación en el mundo, otros 157 están en régimen de parada o en fase de clausura, de los cuales 17 ya han sido completamente clausurados<sup>3</sup>.

55. Hay más de 320 instalaciones del ciclo del combustible en funcionamiento, alrededor de 170 en régimen de parada o en fase de clausura y 125 completamente clausuradas. También hay 246 reactores de investigación en funcionamiento y más de 180 en régimen de parada o en fase de clausura. Más de 300 reactores de investigación y conjuntos críticos han sido completamente clausurados.

56. Desde el comienzo del siglo se ha adquirido una experiencia considerable en el proceso de clausura; los avances más importantes se han dado sobre todo en los países con programas nucleoelectrónicos de larga data, especialmente Alemania, Bélgica, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido. Entre los ejemplos de programas con progresos importantes en el proceso de clausura en 2015 figuran la segmentación de una vasija de presión del reactor de la central nuclear José Cabrera, en España; el inicio de la segunda etapa de clausura de la central nuclear Bohunice V1, en Eslovaquia, y la terminación, en la Federación de Rusia, del programa federal de objetivos a gran escala, titulado “Seguridad nuclear y radiológica en 2008 y para el período hasta 2015”, que incluye considerables actividades de clausura y restauración ambiental.

57. En el Reino Unido sigue avanzándose hacia la clausura de diez centrales nucleares Magnox de la primera generación. El cese de las operaciones de la central nuclear Wylfa (Anglesey, Gales) en diciembre de 2015 marcó la finalización de la era de generación con Magnox, que comenzó con la

---

<sup>3</sup> Datos obtenidos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<http://www.iaea.org/pris>).

conexión a la red de la primera central nuclear a escala industrial del mundo, en Calder Hall (Cumbria, Inglaterra) en agosto de 1956. Wylfa comenzó a funcionar en 1971 y ahora entra en la fase de retirada del combustible antes de su clausura. También prosigue la clausura de los dos reactores rápidos refrigerados por metales alcalinos de Dounreay y su reactor de ensayo de materiales, así como la de los dos reactores de investigación restantes de Winfrith.



*Fig. A-7. Obras de clausura en Sellafield (Reino Unido). (Fotografía: Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares/Sellafield Ltd.)*

58. También hay proyectos en curso en Bulgaria, Eslovaquia y Lituania, en que centrales nucleares se pusieron en régimen de parada antes del final de sus vidas de diseño, con apoyo financiero del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo.

### **Gestión de fuentes radiactivas selladas en desuso**

59. Varios países, como Filipinas, Ghana y Malasia, están estudiando seriamente las opciones para la disposición final de las fuentes radiactivas selladas en desuso, entre ellas la disposición final conjunta con otros desechos en instalaciones apropiadas, un mayor número de opciones de reciclado y repatriación, o la disposición final en pozos barrenados construidos con ese fin. Se ha elaborado una justificación genérica de la seguridad de la disposición final en pozos barrenados para las fuentes de las categorías 3 a 5, y ahora se está haciendo otro tanto para las fuentes de las categorías 1 y 2. Por conducto del Organismo, el Canadá ha prometido fondos en apoyo de programas en Filipinas y Ghana para poner en práctica la disposición final en pozos barrenados y se han emprendido medidas relativas a este proyecto.

60. En 2015 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 en condiciones de almacenamiento adecuadas. Tres fuentes en desuso de las categorías 1 y 2 se retiraron de Honduras y una fuente de la categoría 1 de Marruecos. En el Líbano se completó la repatriación de una fuente radiactiva sellada en desuso de la categoría 1 fabricada en Francia. En el Camerún, el Líbano y Túnez se inició la repatriación, prevista para 2016, de un total de cuatro otras fuentes radiactivas selladas en desuso de la categoría 1 fabricadas en Francia.

61. Se han hecho importantes progresos en la vinculación de la celda caliente móvil de la South African Nuclear Energy Corporation con el diseño de la disposición final en pozos barrenados, con la intención de reducir al mínimo la manipulación de las fuentes y eliminar todo transporte innecesario. Además, se ha diseñado un conjunto de instrumentos móvil a fin de facilitar las operaciones de acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5 y de respaldar la preparación de la disposición final en pozos barrenados. Se completaron las operaciones de capacitación de personal local y regional y de acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso en Bangladesh, Chile, Filipinas, Madagascar, el Paraguay, el Perú y Sri Lanka.

62. El Organismo amplió el acceso al Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados, haciéndolo extensivo a muchas personas en los Estados Miembros, para facilitar así la identificación de las fuentes radiactivas selladas en desuso encontradas sobre el terreno. En 2015 se comenzó a añadir más detalles sobre las fuentes y los dispositivos, para seguir aumentando la utilidad del catálogo.

### **Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos**

63. En cuanto a las antiguas instalaciones, se hicieron progresos notables en Sellafield (Reino Unido), en particular en las dos históricas piscinas al aire libre. En la Piscina de Almacenamiento de Combustible de las Pilas (PFSP), la extracción de todo el combustible encapsulado ha eliminado el riesgo de criticidad asociado con la piscina y ha reducido el inventario radiactivo a la mitad.

64. La Piscina de Almacenamiento de Combustible de la Primera Generación de Magnox (FGMSP) en Sellafield se construyó en la década de 1950 para almacenar, enfriar y preparar el combustible nuclear gastado de Magnox para su reprocesamiento. Dejó de funcionar en 1992 y ahora contiene unos 1400 metros cúbicos de lodo radiactivo, entre otras cosas. En marzo de 2015 se alcanzó a un hito importante al lograr la primera transferencia de lodo radiactivo de esta piscina a un almacén puesto en servicio recientemente.

65. En el Reino Unido, la publicación de una estrategia nacional de desechos de actividad baja (LLW) sólidos ha llevado al desarrollo de un número considerablemente mayor de vías alternativas de tratamiento y disposición final. De resultados de ello, en 2015 el 85 % de los LLW generados por la industria nuclear se desviaron del Repositorio de Desechos de Actividad Baja del Reino Unido a una variedad de opciones de tratamiento, incluidos el reciclado de chatarra, la incineración y la disposición final de desechos de actividad muy baja (VLLW) en vertederos autorizados.

66. Georgia comenzó a probar el funcionamiento de un taller de procesamiento de desechos para reducir al mínimo los desechos y mitigar el riesgo planteado por los desechos históricos. El procedimiento utiliza un dispositivo de corte por plasma y una instalación de descontaminación por granallado adaptada para eliminar los contaminantes radiactivos ligados a la superficie de los tubos de acero provenientes de la clausura de una estación criogénica y del reactor de investigación nuclear de baja temperatura refrigerado por helio IRT-M.

67. Las operaciones de incineración comercial y de fundición de metales en varios países, como Suecia y los Estados Unidos de América, siguen ofreciendo oportunidades de servicios transfronterizos de tratamiento de desechos radiactivos eficaces en función de los costos. Por ejemplo, en casos específicos, las compañías nucleoelectricas canadienses y los Laboratorios Nacionales Canadienses (CNL) podrían enviar ciertos desechos radiactivos de actividad baja antiguos y operacionales a proveedores de servicios con licencia en los Estados Unidos de América, con lo que el volumen de los desechos radiactivos devueltos serían mucho más reducido.

68. En la central nuclear de Novovoronezh, en la Federación de Rusia, se puso en funcionamiento un horno de plasma con una capacidad de 250 kg por hora. El horno se utilizará para procesar desechos sólidos tras la clausura de las dos primeras unidades de la central nuclear. Además, en la central nuclear de Kalinin, una instalación de bituminización para desechos radiactivos líquidos alcanzó su capacidad de diseño, lo que permite la reducción del volumen en un factor de diez y ofrecer servicios a todas las centrales nucleares rusas.

69. El almacenamiento tecnológica y físicamente seguro de los desechos radiactivos en espera de la disposición final es un imperativo clave para los Estados Miembros que tienen un inventario de desechos. En los Países Bajos, la Organización Central para los Desechos Radiactivos (COVRA) ha recibido una licencia para construir un nuevo edificio destinado al almacenamiento provisional de

uranio empobrecido y a la ampliación de la instalación nacional de almacenamiento provisional de desechos de actividad alta, HABOG.

70. Lituania ha iniciado los ensayos en frío de la Instalación de Gestión y Almacenamiento de Desechos Radiactivos Sólidos en la central nuclear Ignalina para procesar los antiguos desechos generados durante la explotación de la central.

71. Bélgica recibió el último de un total de 123 bidones de desechos líquidos de actividad alta inmovilizados en cemento provenientes del reprocesamiento de combustible gastado en el Reino Unido. Estos desechos de período largo y de actividad intermedia se almacenarán en una instalación de almacenamiento construida para ese fin en Dessel a la espera de su disposición final.

72. En el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas de la India, un nuevo proceso de sorción recientemente desarrollado ha separado grandes cantidades de cesio 137 de desechos de actividad alta a fin de producir lápices de cesio 137 vitrificado para su uso como irradiadores de sangre.

73. Las investigaciones del suceso radiológico de febrero de 2014 en la Planta Piloto de Aislamiento de Desechos (WIPP) en Nuevo México (Estados Unidos de América) determinaron que la causa más probable del incidente había sido la incompatibilidad de los desechos (nitratos en contacto con material orgánico). Esta conclusión pone de relieve la importancia de que todos los programas de gestión de desechos radiactivos establezcan procedimientos de caracterización amplios y sólidos para garantizar el cumplimiento de los criterios de aceptación de desechos.

74. El Reino Unido inauguró una instalación nacional, MIDAS, en la Universidad de Sheffield, en asociación con el Departamento de Energía y Cambio Climático del Reino Unido, para prestar apoyo a la gestión de los desechos radiactivos del ciclo del combustible nuclear. La instalación brinda a los diseñadores de tecnología acceso a equipos avanzados, incluidos laboratorios dedicados al procesamiento de alta temperatura, el estudio del comportamiento a largo plazo de la forma de los desechos, y análisis químicos y radioquímicos.

75. Se sigue progresando en la gestión de los grandes volúmenes de agua contaminada y de entrada de agua subterránea en el emplazamiento de la central nuclear de Fukushima. Más de 1 millón de m<sup>3</sup> de agua han sido tratados para eliminar uno de los contaminantes principales, el cesio, y se está preparando la eliminación del estroncio para ampliar los Sistemas Avanzados de Procesamiento de Líquidos existentes. Además, se logró poner en funcionamiento un sistema de desviación de aguas subterráneas diseñado para controlar la entrada de estas al reactor y al edificio de la turbina, reduciendo el ingreso de esas aguas a un 25 % (100 m<sup>3</sup>) aproximadamente por día. Prosigue la construcción del muro de hielo alrededor de las zonas donde se encuentran las Unidades 1 a 4.

### **Disposición final de desechos radiactivos**

76. 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 gastado. Entre esas instalaciones cabe citar las de disposición final en zanjas para VLLW (p. ej., en España, los Estados Unidos de América, Francia y Suecia), o para LLW en zonas áridas (p. ej., en la Argentina, los Estados Unidos de América, la India y Sudáfrica); las estructuras artificiales cercanas a la superficie para LLW (p. ej., en China, Eslovaquia, España, Francia, la India, el Japón, Polonia, el Reino Unido y la República Checa), y las estructuras artificiales para desechos de actividad baja e intermedia (LILW) situadas en formaciones geológicas a diversas profundidades (p. ej., en Alemania, los Estados Unidos de América, Finlandia, Hungría y Suecia).

77. Otras instalaciones de disposición final para LILW se encuentran en distintas etapas del proceso de concesión de licencias, p. ej., en Alemania (Konrad), Bélgica (Dessel), Bulgaria (Radiana), el Canadá (Kincardine), Eslovenia (Vrbina, Krško), Lituania (Stabatiškės) y Rumania (Saligny).

78. Las opciones para la disposición final de los desechos de materiales radiactivos naturales varían según los reglamentos nacionales y abarcan desde instalaciones de disposición final en zanjas hasta estructuras artificiales subsuperficiales, como en Noruega.

79. En Finlandia, la organización de gestión de desechos Posiva recibió la licencia de construcción para la instalación de disposición final geológica de combustible nuclear gastado de Olkiluoto. Las obras de construcción conforme a la licencia pueden comenzar hacia finales de 2016 y se prevé que la instalación de disposición final estará lista para funcionar en 2023.

80. En Suecia, al presentar algunos resultados preliminares del examen reglamentario en curso de la solicitud de licencia de la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares SKB para un repositorio de combustible nuclear gastado, la Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica afirmó que “SKB ha demostrado que hay perspectivas de satisfacer las normas de seguridad nuclear y protección radiológica de la Autoridad.”

81. La Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos de Francia está elaborando un informe resumido de la seguridad de Cigéo, su proyecto de disposición final geológica de desechos de actividad alta, en preparación de la solicitud completa de licencia, prevista para 2017.

82. El proyecto del Canadá para desarrollar un repositorio geológico profundo para los LILW de Ontario Power Generation en el emplazamiento nuclear Bruce en Kincardine, Ontario, recibió en mayo una recomendación favorable del Grupo de Examen Conjunto establecido en 2012 para evaluar la instalación propuesta. El Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático pospuso a 2016 la decisión oficial, esperada en diciembre de 2015, debido a la oposición de partes interesadas nacionales y transfronterizas preocupadas por la relativa cercanía del repositorio al lago Hurón.

83. China tendrá necesidades de disposición final geológica de resultados del reprocesamiento de 140 000 toneladas de combustible gastado de un conjunto de 48 reactores. Se está construyendo un túnel experimental en el emplazamiento de Beishan como paso previo a la construcción de la primera instalación de investigación subterránea en apoyo al programa de disposición final geológica.

84. En Alemania, se han reasignado las responsabilidades para la disposición final de desechos radiactivos creando dos organizaciones federales nuevas: la Compañía Federal de Gestión de Desechos Nucleares y la Oficina Federal de Regulación de la Gestión de Desechos Nucleares. A fin de orientar la futura evolución del repositorio geológico profundo nacional, se prevé que una comisión nacional de selección de un emplazamiento, establecida en 2013, recomiende criterios de selección de emplazamientos y requisitos para la participación de las partes interesadas, e indique si podrían considerarse alternativas a la disposición final geológica.

85. Está avanzando el desarrollo del repositorio cerca de la superficie para LLW en el emplazamiento de Talmesi (República Islámica del Irán). Se ha recibido la licencia de selección del emplazamiento y ha finalizado la construcción de la instalación central de almacenamiento en el emplazamiento de disposición final.

86. El Japón ha ordenado a la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares que vuelva a examinar el enfoque de selección del emplazamiento para el repositorio geológico profundo para HLW y ha organizado una serie de actividades de información para sensibilizar al público en general.

87. En agosto se inauguró en la República de Corea el repositorio subterráneo tipo silo en Wolsong (fig. A-8). La construcción de la instalación de disposición final de la segunda fase ha comenzado y su finalización está prevista para 2019. Según los planes, albergará 800 000 bidones de LLW e ILW y funcionará durante 60 años.

88. La Federación de Rusia va avanzando en el desarrollo de un repositorio geológico profundo en Krasnoyarsk y ha autorizado la construcción de una instalación subterránea de investigación para seguir investigando la formación de Nizhnekamsky.

89. Las primeras dos cámaras de almacenamiento de una nueva instalación de disposición final en Dounreay, en Escocia del norte (Reino Unido), comenzaron a recibir desechos. Las cámaras están diseñadas para albergar todos los LLW sólidos y los desechos de demolición derivados de la clausura de los reactores rápidos y las plantas de reprocesamiento del emplazamiento, para así reducir al mínimo el transporte de los desechos desde el lugar remoto. La instalación de disposición final para LLW en el emplazamiento de Drigg ha obtenido la renovación de su permiso ambiental. El Gobierno del Reino Unido publicó en 2014 un Libro Blanco, titulado *Implementing Geological Disposal*, en que se describe un marco para la gestión a largo plazo de los desechos radiactivos de actividad más alta. En él se expone un enfoque para determinar posibles emplazamientos para una instalación de disposición final geológica basado en el trabajo con las comunidades interesadas, y comienza con una fase de diálogo y participación de las partes interesadas.



*Fig. A-8. Contenedores de desechos y primeras actividades de disposición final en Wolsong. (Fotografías: Agencia de Desechos Radiactivos de Corea)*

90. El Departamento de Energía de los Estados Unidos ha emitido una solicitud de propuestas para entidades interesadas en proveer un emplazamiento para ensayos, contratistas de perforaciones y un equipo de gestión del emplazamiento con objeto de perforar un pozo barrenado de caracterización de 5000 m de profundidad como parte de su Ensayo de Pozos Barrenados Profundos. El concepto consiste en perforar un pozo barrenado (o un conjunto de pozos) en la roca del basamento cristalino hasta una profundidad de alrededor de 5000 m, colocar contenedores de desechos en los 3000 m inferiores del pozo y luego sellar el pozo hasta la superficie.

#### **A.4. Seguridad**

91. Se siguieron introduciendo mejoras de la seguridad en las centrales nucleares de todo el mundo. Ello incluyó la determinación y aplicación de las enseñanzas extraídas del accidente de Fukushima Daiichi, la mejora de la eficacia de la defensa en profundidad, el fortalecimiento de la capacidad de preparación y respuesta para casos de emergencia, el mantenimiento y la mejora de la creación de capacidad, y la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante.

92. El Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear siguió siendo la base de las medidas adoptadas por los Estados Miembros, la Secretaría y otras partes interesadas pertinentes para reforzar el marco de seguridad nuclear. El Organismo continuó compartiendo y difundiendo las enseñanzas extraídas del accidente mediante el análisis de los aspectos técnicos pertinentes. Organizó la Reunión de Expertos Internacionales sobre la Mejora de la Eficacia de la Investigación y el Desarrollo a la luz del Accidente de la Central Nuclear de Fukushima Daiichi, en cooperación con la Agencia para la Energía Nuclear (AEN de la OCDE), y la Reunión de Expertos Internacionales sobre Evaluación y Pronóstico en Respuesta a Emergencias Nucleares o Radiológicas.

93. El Organismo publicó su informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi, que comprende cinco volúmenes técnicos detallados. El informe fue el fruto de una extensa labor de colaboración internacional

en la que participaron cinco grupos de trabajo integrados por unos 180 expertos procedentes de 42 Estados Miembros, con y sin programas nucleoelectrónicos, y varios órganos internacionales.

94. De conformidad con la decisión de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear adoptada en su Sexta Reunión de Examen, el Director General convocó una Conferencia Diplomática en febrero para examinar una propuesta de enmienda de la Convención presentada por Suiza. La Conferencia Diplomática aprobó por unanimidad la Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear, que incluía principios para orientar a las Partes Contratantes en la aplicación de uno de los objetivos de la Convención, que es prevenir los accidentes con consecuencias radiológicas y mitigar esas consecuencias en caso de que se produzcan.

95. La seguridad operacional de las centrales nucleares sigue siendo alta, como demuestran los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La fig. A-9 muestra el número de paradas de emergencia, o disparos, manuales y automáticos no previstos registrados por cada 7000 horas (aproximadamente un año) de funcionamiento por unidad. Las paradas de emergencia son solo uno de los indicadores del comportamiento de la seguridad, pero se utilizan comúnmente como medida del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales, expresado en términos de la reducción del número de transitorios termohidráulicos y de reactividad no deseados y no previstos que requirieron la parada de emergencia del reactor.

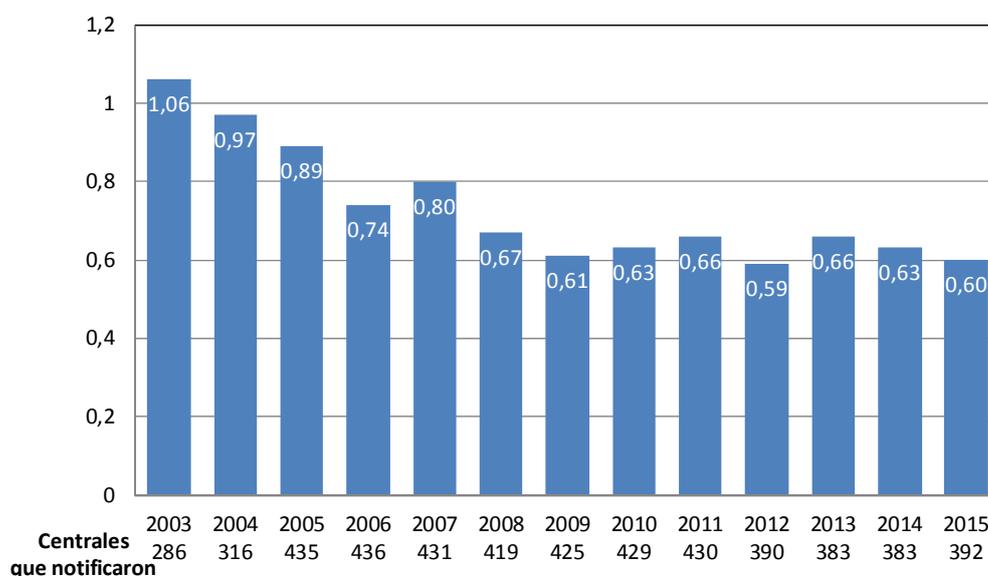


Fig. A-9. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales que se producen cada 7000 horas de funcionamiento por unidad. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia <http://www.iaea.org/pris>)

## B. Fisión avanzada y fusión

### B.1. Fisión avanzada

#### B.1.1. Reactores refrigerados por agua

96. Los reactores refrigerados por agua (WCR) han desempeñado un papel importante en la industria nuclear comercial desde su inicio, superando los 16 000 años-reactor de funcionamiento, y actualmente representan más del 95 % de todos los reactores de potencia civiles en funcionamiento en el mundo. De los 65 reactores nucleares en construcción, 63 son reactores refrigerados por agua ligera o pesada.

97. Las principales novedades del sector de los WCR en 2015 fueron cuatro nuevas construcciones, ocho nuevas conexiones a la red, el aumento de la potencia en centrales existentes y el incremento permanente de los factores de capacidad en todos los tipos de WCR, así como nuevas centrales propuestas para países que aún no tienen reactores comerciales en explotación.

98. Una forma competitiva, desde una perspectiva económica, de incrementar la capacidad nuclear en un país es aumentar la producción de electricidad autorizada de las centrales existentes. Todos los WCR avanzados han registrado un aumento de la producción eléctrica, que en las construcciones recientes se situaba entre 1000 MW (fig. B-1) y 1650 MW por unidad. Además, hay una tendencia clara a los emplazamientos con unidades múltiples con uno o múltiples tipos de reactor, lo que pone de relieve las economías de escala en los reactores nucleares comerciales.



*Fig. B-1. Central nuclear WWER-1000 en construcción en el emplazamiento nuclear de Kudankulam. (Fotografía: OIEA)*

99. En varios países también se están contemplando, estudiando e implementando cada vez más versiones avanzadas de WCR existentes para la utilización gradual de ciclos del combustible avanzados y más eficientes, cerrados total o parcialmente.

100. Varios Estados Miembros están realizando actividades de investigación y desarrollo (I+D) sobre reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR). Se finalizaron los diseños conceptuales del SCWR del Canadá, un concepto de reactor de tubos de presión moderado por agua pesada, y de China (CSR1000). En Europa, hace unos años se puso en marcha un concepto de reactor de agua ligera de alto rendimiento europeo. En la Federación de Rusia se están realizando estudios conceptuales sobre un reactor de potencia refrigerado y moderado por agua de presión supercrítica (WWER-SCP), incluida la posibilidad de un núcleo de espectro de neutrones rápidos.

101. El Organismo sigue manteniendo y actualizando su Sistema de Información sobre Reactores Avanzados, una base de datos que incluye información suministrada por las organizaciones de diseño.

### **B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos**

102. Desde 1960 se han ejecutado 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. El interés mundial en el desarrollo de estos reactores ha aumentado debido a su capacidad distintiva de suministrar una fuente de energía eficiente, segura, sostenible y limpia.

103. Los reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), los reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR) y plomo-bismuto (SVBR), y los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR) que se desarrollan actualmente a nivel nacional e internacional cumplen normas más estrictas de seguridad, sostenibilidad, economía, protección física y resistencia a la proliferación. Además, como opción a largo plazo se contempla el concepto de reactor rápido de sales fundidas (MSR).

104. La tecnología de reactores rápidos más madura, la del SFR, tiene más de 400 años-reactor de experiencia adquirida a través del diseño, la construcción y la explotación de unidades experimentales, prototípicas, de demostración y comerciales 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.

105. El SFR BN-600 ruso ha mostrado un comportamiento operacional notable al alcanzar en 2014 un factor de carga del 86 %. El SFR BN-800 (fig. B-2) se conectó a la red en 2015. Se ha completado el diseño final del innovador BN-1200. En mayo de 2015, el reactor de investigación rápido multipropósito refrigerado por sodio obtuvo una licencia de construcción de la autoridad reguladora y concluyeron las obras preliminares de ingeniería civil; se prevé que sustituirá al reactor BOR-60 en 2020. En cuanto a la tecnología de metal líquido pesado, se han completado los diseños de ingeniería del BREST-OD-300, un concepto de LFR avanzado, y del SVBR-100, un reactor rápido modular refrigerado por plomo-bismuto.

106. En la India, el reactor reproductor rápido de ensayo lleva en funcionamiento desde octubre de 1985; se ha terminado de construir el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e) y se ha iniciado su puesta en servicio, y la primera criticidad está prevista en 2016. La India prevé construir otros dos reactores reproductores rápidos en el mismo emplazamiento.

107. La primera etapa del desarrollo de la tecnología de reactores rápidos en China se alcanzó en diciembre de 2014 cuando el Reactor Experimental Rápido de China alcanzó el 100 % de potencia. Se prevé que el innovador CFR-600 estará en funcionamiento en 2023. El reactor de investigación refrigerado por plomo de China CLEAR-I también se encuentra en la etapa preliminar de diseño de ingeniería.

108. En el Japón, el reactor rápido experimental JOYO y el prototipo de SFR Monju están en régimen de parada a largo plazo. La fase II del programa de desarrollo de tecnología del ciclo de reactores rápidos, que incluye la demostración de tecnologías clave así como el diseño conceptual del reactor rápido refrigerado por sodio del Japón, también se ha suspendido.

109. En la República de Corea se está llevando a cabo el diseño preliminar del prototipo de reactor rápido refrigerado por sodio de la Generación IV, junto con las actividades de I+D de apoyo. El documento preliminar de información de seguridad se presentó a la autoridad reguladora nuclear de Corea a fines de 2015.

110. En Europa se están desarrollando los conceptos siguientes: ASTRID, el prototipo industrial francés de un SFR de la Generación IV; ALFRED, la demostración europea de un LFR de la Generación IV; ALLEGRO, el GFR experimental; y MYRRHA, un reactor piloto de investigación refrigerado por plomo-bismuto basado en un sistema accionado por acelerador. ASTRID llegará al final de la fase de diseño conceptual a fines de 2015. MYRRHA ha alcanzado la segunda fase del diseño de ingeniería de la parte inicial.

111. En los Estados Unidos de América, los esfuerzos en relación con los reactores rápidos se centran principalmente en la creación de capacidades técnicas básicas y algunas opciones de tecnología innovadora. Sobre la base de un conjunto amplio de datos experimentales provenientes de la antigua explotación de varios SFR experimentales, el Departamento de Energía presta apoyo a actividades de I+D en esferas como los materiales avanzados, la seguridad y los combustibles innovadores. También hay en curso investigaciones de empresas privadas sobre diseños de reactores rápidos.



Fig. B-2. El reactor rápido comercial BN-800 de la central nuclear de Beloyarsk (Federación de Rusia) se conectó a la red en diciembre de 2015. (Fotografía: Rosenergoatom)

### B.1.3. Reactores refrigerados por gas

112. La era de la primera generación de reactores refrigerados por gas (GCR) terminó a fines de 2015 cuando cesaron las operaciones de Wylfa 1, el último reactor Magnox que quedaba. El Reino Unido sigue explotando comercialmente 14 GCR avanzados. Muchos Estados Miembros siguen trabajando en el desarrollo de reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR). Estos reactores utilizan combustible de partículas revestidas, pueden lograr un quemado muy elevado, funcionan a temperaturas más altas ( $\geq 700^{\circ}\text{C}$ ) y utilizan helio como refrigerante. Actualmente solo se están teniendo en cuenta diseños que responden al concepto de HTGR modular más pequeño para que el reactor se base únicamente en las características de seguridad inherentes y no en sistemas de seguridad activos. Se está estudiando la posibilidad de una utilización a corto plazo para la generación eficiente de energía y la cogeneración a fin de atender el enorme mercado del calor industrial.

113. En China, la construcción y la fabricación de los componentes principales del reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) avanza de manera satisfactoria (fig. B-3). Esta central industrial de demostración de 200 MW(e) consta de dos unidades de reactor de 250 MW(t) y previsiblemente estará en funcionamiento a fines de 2017. Se está diseñando una central comercial de 600 MW(e) y se han determinado los posibles emplazamientos. Se ha establecido la tecnología de fabricación de combustible a escala industrial y en 2014 se completaron los ensayos internacionales de irradiación de las esferas de combustible, con ensayos en las condiciones de accidente previstas. La construcción y la puesta en servicio de la nueva planta de fabricación de combustible en Baotou han finalizado y se prevé que la producción comenzará en 2016.



Fig. B-3. Lugar de construcción (izquierda) y generador de vapor (derecha) del HTR-PM en Shidao Bay, Weihai City (China). (Fotografías: Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías)

114. La Agencia Nacional de Energía Nuclear de Indonesia finalizó el diseño conceptual y el informe preliminar de análisis de la seguridad del reactor modular de lecho de bolas experimental de 10 MW(t) y presentó al regulador la evaluación inicial del emplazamiento. También está prevista la futura utilización comercial con fines de cogeneración.

115. En el Japón, una vez finalizado el examen reglamentario para poner nuevamente en marcha el reactor experimental de alta temperatura (HTTR) de 30 MW(t), se prevé la realización de nuevos ensayos de demostración de la seguridad y el acoplamiento a una turbina de gas de helio y una planta de producción de hidrógeno.

116. En los Estados Unidos de América prosiguieron las actividades relacionadas con el HTGR como parte del programa de conceptos de reactores avanzados del Departamento de Energía. Esas actividades se centran en la cualificación del combustible, la cualificación del grafito y los materiales de alta temperatura, las instalaciones de ensayo para ilustrar las características de seguridad pasiva y la elaboración del marco de concesión de licencias. También hay empresas privadas que están elaborando diseños de reactores refrigerados por gas.

117. Se han emprendido actividades en relación con el HTGR en Kazajstán, Sudáfrica, Ucrania y la Comisión Europea. En la Federación de Rusia prosiguen los preparativos para poder calentar la instalación crítica ASTRA a diferentes temperaturas y en la República de Corea se realizó el primer ensayo de irradiación de combustible de partículas revestidas.

#### **B.1.4. Reactores pequeños y medianos o modulares**

118. El interés en los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR) y sus aplicaciones es cada vez mayor. En los últimos diez años, la atención ha estado centrada en los reactores modulares avanzados. Estos, que representan las principales líneas y tipos de refrigerante, pueden producir hasta 300 MW(e) y sus componentes se pueden fabricar industrialmente y transportar como módulos hasta los emplazamientos o las compañías eléctricas conforme surja la demanda. Los principales impulsores del desarrollo de estos reactores son satisfacer la necesidad de generación de electricidad flexible para una variedad más amplia de usuarios y aplicaciones, reemplazar las centrales de combustibles fósiles envejecidas, mejorar el comportamiento de la seguridad mediante características de seguridad pasiva y ofrecer mayor asequibilidad económica. En todo el mundo hay unos 50 diseños y conceptos de SMR. La mayoría de ellos están en diversas etapas de desarrollo y de algunos se afirma que podrán utilizarse a corto plazo. Sin embargo, hay tres SMR en construcción en la Argentina, China y la Federación de Rusia.

119. Muchos de los SMR utilizables a corto plazo son del tipo de reactor de agua a presión integrado (IPWR). Hay tres SMR en etapas avanzadas de construcción: en la Federación de Rusia, se prevé que el KLT-40S, una central nuclear transportable basada en un PWR con una capacidad de 35 MW(e) por módulo, producirá electricidad y se conectará a la red en 2019; en la Argentina, se espera que el prototipo de IPWR de circulación natural con una capacidad de 31 MW(e), denominado CAREM-25, estará en condiciones de iniciar la puesta en servicio y de criticidad en octubre de 2018; y en China se prevé que el HTR-PM refrigerado por gas que consta de dos reactores de 250 MW(t) para suministrar 200 MW(e) entrará en funcionamiento hacia fines de 2017 como central de demostración industrial.

120. Con respecto a los SMR destinados a la utilización a corto plazo, en la República de Corea, el reactor modular avanzado integrado en el sistema (SMART), un IPWR que suministra 100 MW(e), recibió la aprobación del diseño estándar de la Comisión de Seguridad Nuclear Tecnológica y Física del país en 2012. En septiembre de 2015 se firmó un acuerdo técnico previo al proyecto para la utilización de un reactor SMART en la Arabia Saudita.

121. En China, el reactor ACP100, un IPWR con una capacidad de 100 MW(e), está siendo objeto del Examen Genérico de la Seguridad de los Reactores del Organismo. Hay una central industrial de demostración con dos centrales de 310 MW(t) planificada en la provincia de Fujian.

122. La Federación de Rusia tiene algunos otros diseños de SMR utilizables a corto plazo en centrales nucleares transportables flotantes, entre ellos el RITM200, para producir 50 MW(e); el ABV6-M —un SMR de circulación natural para generar 6 MW(e)—, y el VBER-300, con una potencia eléctrica de 300 MW(e).

123. En los Estados Unidos de América, NuScale Power está preparando la solicitud de certificación del diseño de su reactor NuScale para presentarla a la Comisión Reguladora Nuclear en el último trimestre de 2016. Se trata de un IPWR de circulación natural compuesto de 12 módulos de reactores, cada uno con una potencia neta de 50 MW(e). Otro diseño de IPWR es el reactor de doble módulo Generation mPower de BWX Technologies/Bechtel, que tiene una potencia nominal de 180 MW(e) por módulo. También están en fase de desarrollo el Westinghouse SMR, que generará 225 MW(e), y el Holtec SMR-160, con circulación natural, que producirá 160 MW(e).

124. En el Japón, 4S (*Super-Safe, Small and Simple*), es un reactor refrigerado por sodio sin recarga de combustible *in situ*. El 4S ofrece dos potencias de salida: 30 y 135 MW(t) como fuente de energía distribuida para aplicaciones polivalentes. El “Modular Simplified and Medium Small Reactor” (también denominado DMS) es un SMR de tipo BWR de circulación natural con una potencia eléctrica de salida de 300 MW(e).

125. Hay numerosos diseños de SMR que se encuentran en la etapa de diseño conceptual: en la India se está desarrollando el AHWR300-LEU, un reactor de tubos de presión moderado por agua pesada con una capacidad de 304 MW(e) y un sistema primario de circulación natural.

126. En Francia, Flexblue es un SMR transportable anclado al fondo marino con una capacidad de 160 MW(e) por módulo. Flexblue está diseñado para su operación remota desde una sala de control en tierra.

127. En el Canadá se está desarrollando el reactor integral de sales fundidas (IMSR), que ofrece tres diseños: IMSR80, IMSR300 e IMSR600 con una capacidad eléctrica de 32,5 MW(e), 141 MW(e) y 291 MW(e) respectivamente.



Fig. B-4. Ejemplo del calendario de utilización de los SMR.

### **B.1.5. Iniciativas internacionales relacionadas con los sistemas de energía nuclear innovadores**

128. Debido a las crecientes preocupaciones sobre la disponibilidad de recursos, el cambio climático y la seguridad energética, en los últimos decenios se han emprendido varias iniciativas internacionales en relación con los sistemas de energía nuclear innovadores.

129. El Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO) se inició en 2000 como un proyecto del Organismo al reconocer la necesidad de adoptar medidas para que la energía nuclear se desarrolle de manera sostenible. En 2015, Tailandia se convirtió en el 41<sup>er</sup> miembro del INPRO, que reúne a los propietarios y a los usuarios de tecnologías para analizar juntos las medidas internacionales y nacionales necesarias para lograr las innovaciones deseadas en los reactores nucleares y los ciclos del combustible.

130. En 2014-2015 se publicaron, como informes de la *Colección de Energía Nuclear del OIEA*, tres manuales sobre la evaluación de la sostenibilidad en las esferas de la economía, la infraestructura y los efectos ambientales, incluido el agotamiento de los recursos. En Indonesia, Rumania y Ucrania se están realizando evaluaciones de los sistemas de energía nuclear basadas en la metodología del INPRO.

131. El Foro Internacional de la Generación IV (GIF) es el resultado de un esfuerzo internacional de cooperación emprendido con el fin de llevar a cabo las actividades de I+D necesarias para determinar la viabilidad y las capacidades en relación con el comportamiento de la próxima generación de reactores nucleares. El GIF, que cuenta con 13 miembros, se centra en seis sistemas de energía nuclear, como se describe en su publicación *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems* de 2012 y su actualización de 2013: reactores GFR, reactores de muy alta temperatura (VHTR), SCWR, SFR, LFR y MSR.

132. Los miembros del GIF interesados en realizar actividades cooperativas de I+D sobre uno o más de los sistemas seleccionados participan en proyectos de I+D comunes, que tienen productos, hitos y calendarios bien definidos y un marco contractual claramente establecido.

133. Los miembros del 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 el riesgo y la seguridad. También intercambian información sobre los proyectos en curso relacionados con las seis tecnologías de reactores seleccionadas.

134. Otra actividad importante en la esfera de los SFR iniciada en 2011 por el GIF, en cooperación con el Organismo, es la elaboración de criterios de diseño de seguridad y las iniciativas destinadas a armonizarlos con las directrices de diseño 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 SFR de la Generación IV. En 2014 se publicó una primera versión de los criterios de diseño de seguridad para los SFR. Se está considerando la posibilidad de ampliar esta actividad a otros sistemas de la Generación IV, como los VHTR y los LFR.

135. La Plataforma Tecnológica para la Energía Nuclear Sostenible (SNE-TP), puesta en marcha por la Unión Europea en 2007, promueve la investigación, el desarrollo y la demostración de las tecnologías de fisión nuclear necesarias para cumplir el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética. La Agenda Estratégica de Investigación e Innovación y la Estrategia de Despliegue de la SNE-TP se han actualizado recientemente. La SNE-TP reúne a más de 100 partes interesadas europeas procedentes de la industria, la investigación, el mundo académico, organizaciones técnicas de seguridad, organizaciones no gubernamentales y representantes nacionales.

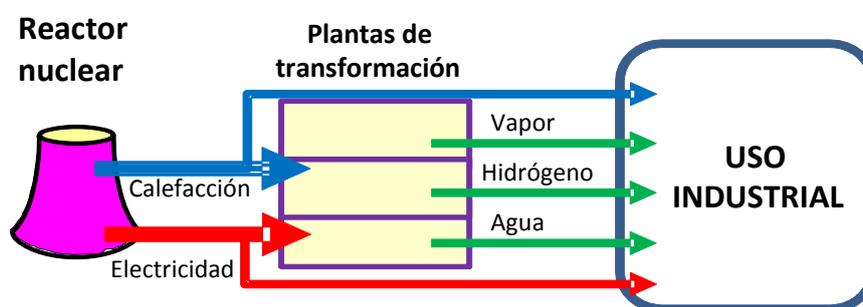
136. En el marco de la SNE-TP, la Iniciativa Industrial Europea sobre Fisión Nuclear Sostenible, que la UE puso en marcha en 2010, se ocupa de las necesidades europeas en relación con la demostración de

las tecnologías de reactores de neutrones rápidos de la Generación IV, sus infraestructuras de investigación, las instalaciones de combustible y las actividades de I+D. Se centra en el desarrollo de dos tecnologías paralelas: la tecnología del reactor de neutrones rápidos refrigerado por sodio como solución de referencia, con el inicio hacia 2020 de la construcción de un prototipo en Francia que apoyará firmemente esta tecnología (Astrid); y tecnologías alternativas de reactor rápido refrigerado por plomo (ALFRED) y de reactor rápido refrigerado por gas (ALLEGRO). Además, una instalación de irradiación refrigerada por plomo-bismuto (MYRRHA) prestará apoyo a la utilización de la tecnología de reactores rápidos, incluido el reciclaje de actínidos para la transmutación.

### B.1.6. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrónica

137. El uso de la energía nuclear para aplicaciones no eléctricas, especialmente para la desalación de agua de mar, la producción de hidrógeno, la calefacción urbana, la recuperación terciaria de crudo y otras aplicaciones industriales, reviste gran interés para varios Estados Miembros.

138. Las tecnologías requeridas para la cogeneración (es decir, la producción de electricidad y calor industrial, véase la fig. B-5) ya se han demostrado y probado. En el caso de la cogeneración nuclear, existe considerable experiencia en las categorías de calefacción urbana y desalación de agua de mar, con una experiencia acumulada total de más de 750 años de funcionamiento de 74 reactores nucleares. Las centrales nucleoelectrificadas actuales en cogeneración nuclear pueden lograr un aumento de la eficiencia térmica global de más del 30 %, una reducción del costo de generación de energía eléctrica de hasta el 20 % y una mejora en la flexibilidad de la red eléctrica. Cuando se disponga de sistemas energéticos avanzados e innovadores diseñados para temperaturas del refrigerante a la salida del reactor muy altas, algunos procesos industriales, como la producción de hidrógeno, que requieren calor o vapor a altas temperaturas, se beneficiarán de una fuente de energía muy fiable, abundante y sostenible.



*Fig. B-5. Esquema general para acoplar un reactor nuclear a una planta industrial en el emplazamiento del reactor.*

139. Recientemente, la Federación de Rusia firmó acuerdos con Argelia, Egipto y Jordania, y mantiene conversaciones con la Arabia Saudita sobre la utilización de energía nucleoelectrónica para la desalación de agua de mar. La Arabia Saudita ha firmado un memorando de entendimiento con la República de Corea respecto de dos PWR SMART de 330 MW(t) que se utilizarán para la cogeneración, incluida la desalación de agua de mar, y está en conversaciones con Francia sobre planes futuros para desalar agua de mar utilizando energía nuclear. Los dos PWR de la central nuclear de potencia Diablo Canyon en California (Estados Unidos de América) pueden producir casi 1,5 millones de galones de agua potable por día, pero para consumo en el emplazamiento utilizan solo el 40 % de esa capacidad. Tras haber obtenido la prórroga de sus licencias de explotación hasta 2024 y 2025 y en vista de la severa sequía reciente, en mayo de 2015 el explotador acordó suministrar agua al condado al que pertenece el emplazamiento para contribuir a la lucha contra incendios. También se está examinando la integración de esta agua potable en los sistemas de abastecimiento público de agua.

140. La producción de hidrógeno es objeto de una amplia gama de actividades, en particular en los Estados Unidos de América y la UE. El objetivo es facilitar la aplicación de la energía nuclear en el sector del transporte y reducir la dependencia actual de los combustibles fósiles, con sus factores conexos de inestabilidad de precios, oferta finita y emisiones de gases de efecto invernadero. Se están ejecutando programas de I+D en varios países y hay cierta experiencia en aplicaciones de alta temperatura de la energía nuclear a escala de laboratorio, así como la adquirida en los ensayos de componentes de programas anteriores de HTGR. Sobre la base del éxito de desarrollo y el funcionamiento del HTTR de 30 MW(t), el Japón está perfeccionando el HTTR mediante un proyecto para demostrar la cogeneración tanto de electricidad, por una turbina de gas, como de hidrógeno, mediante un proceso de separación termoquímica del agua. Está previsto que este sistema entre en funcionamiento en 2022. El proyecto tiene por objeto desarrollar plenamente la tecnología del sistema, incluida una base de datos de concesión de licencias necesaria para la construcción, prevista para 2030, de la central comercial GT-HTR300 de cogeneración de hidrógeno y desalación. El HTR-PM, en construcción en China, puede utilizarse para producir vapor de proceso o hidrógeno. En el Canadá, la India, la República de Corea y otros países siguen realizándose otras actividades de I+D con participación de la industria.

141. La política energética de la UE y el objetivo principal de descarbonización para 2050 podrían convertir a Europa en el primer lugar de puesta en práctica de la cogeneración nuclear a gran escala. Debido a su gran mercado industrial, Europa está mostrando interés en la utilización de la cogeneración nuclear en refinerías, plantas químicas y otras industrias en que las centrales de cogeneración de combustibles fósiles pueden reemplazarse directamente por reactores nucleares que ofrezcan simultáneamente grandes cantidades de vapor de proceso y electricidad. Un estudio realizado en Francia mostró que actualmente la explotación de reactores nucleares podría modificarse fácilmente para abastecer de forma eficiente redes de calefacción a gran escala. Este paso podría introducir una nueva perspectiva en la gestión de la energía y allanar el camino para un sustancioso ahorro de energía en el futuro.

## **B.2. Fusión**

142. Obtener energía a partir de la fusión nuclear se considera generalmente el gran desafío de la ingeniería en el siglo XXI. Tras el establecimiento del proyecto del Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER) en 2006, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, la India, el Japón, la República de Corea y la UE han aunado esfuerzos para demostrar la viabilidad científica y tecnológica y las características de seguridad de la producción de energía a partir de la fusión por encima de 500 MW para su utilización con fines pacíficos.

143. Los años de arduo trabajo de todas las partes en el proyecto del ITER están dando frutos a medida que la instalación toma forma y progresa en todos los frentes. La finalización del primer piso del complejo Tokamak (que tiene una superficie de 9600 m<sup>2</sup> y un grosor de 1,5 m de hormigón armado de cuatro capas sucesivas —dos de 50 cm, una de 30 cm y una de 20 cm—) en el último trimestre de 2014 ha marcado el fin de un importante contrato de obras civiles y el comienzo de la fase de construcción (fig. B-6).



*Fig. B-6. Vista aérea del lugar de construcción del ITER en agosto de 2015 (izquierda). Al 21 de octubre de 2015 (derecha), se había construido el segmento de 200° del blindaje ecológico del ITER, el “anillo” de 3,2 m de grosor que rodeará la máquina. (Fotografías: ITER)*

144. El ITER, cuya infraestructura cumplirá los requisitos de seguridad nuclear franceses, será la instalación nuclear más grande de Francia y la primera instalación de fusión nuclear del mundo. En mayo de 2015, el proyecto alcanzó un hito de construcción cuando los primeros componentes de la central —dos de los cuatro transformadores eléctricos que conectarán la red de 400 kV al sistema de distribución eléctrica de corriente alterna— fueron instalados en sus posiciones permanentes.

145. Mientras los asociados tratan de resolver los extraordinarios desafíos del ITER, se reconoce de forma generalizada la necesidad de comprender las cuestiones científicas y técnicas para ir más allá del ITER y de comenzar a abordarlas ya. Colectivamente, las actividades de desarrollo de soluciones para aprovechar la energía de fusión están agrupadas en un programa denominado DEMO (central de demostración de la fusión).

146. El tercer taller del Organismo sobre el programa DEMO se celebró del 11 al 15 de mayo de 2015 en el campus de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, en Hefei (China), con el objetivo de debatir un subconjunto de cuestiones científicas, técnicas y programáticas clave de una central de demostración de la fusión y de definir las instalaciones y las actividades del programa que puedan ayudar a su resolución. Un objetivo conexo fue señalar las oportunidades en que la colaboración internacional pueda permitir acelerar el progreso.

147. Los resultados del taller indicaron que la principal contribución del ITER al programa de fusión será avanzar en los conocimientos sobre el plasma en condiciones de quemado desde el punto de vista de la física. Además, el ITER realizará progresos considerables en cuestiones problemáticas de estabilidad y control del plasma, incluidas la predicción y la evitación o mitigación de las interrupciones importantes del plasma y el control de los modos localizados en el borde.

148. En cuanto a la tecnología de descarga de energía, el ITER ayudará a determinar los efectos a largo plazo del plasma en los componentes expuestos a él, como el daño producido por los iones en los materiales de la primera pared y del divisor. En la medida en que DEMO utilice sistemas de calefacción y generación de corriente semejantes a los del ITER, este proporcionará demostraciones directas de la factibilidad técnica de varios componentes clave. Por último, el ITER contribuirá a la tecnología relativa al manto por medio del Programa de Módulos de Prueba del Manto. La experiencia demuestra que el diseño técnico y el análisis de integración deberían ser tan detallados como sea posible y que toda validación y cualificación debería establecerse antes de presentar el análisis de seguridad preliminar al regulador. El ITER proporcionará una base de datos integral de física y tecnología para uso de los diseñadores de la DEMO, en la que se apoyará el análisis necesario para satisfacer la necesidad de detalle en el análisis de seguridad preliminar.

149. Varias de las partes en el ITER han orientado su atención a estudios sobre dispositivos integrados que van más allá del ITER. A diferencia del ITER, estos estudios son nacionales y

actualmente se encuentran solo en las etapas preconceptuales de diseño. El cuadro B-1 resume la información que se presentó en el taller sobre cuatro de estos dispositivos.

	<b>EU DEMO</b>	<b>JA DEMO</b>	<b>K-DEMO</b>	<b>CFETR (Fase I)</b>
Misión	Producción neta de electricidad ( $Q_{eng} > 1$ ) Autosuficiencia del tritio	Producción neta de electricidad ( $Q_{eng} > 1$ ) Autosuficiencia del tritio	Producción neta de electricidad ( $Q_{eng} > 1$ ) Autosuficiencia del tritio Ensayos de materiales y componentes en un entorno de fusión	Ensayos de materiales y componentes en un entorno de fusión Ciclo completo del combustible de tritio
$P_{fus}$	2000 MW	1500 MW	$\geq 300$ MW	50 MW-200 MW
TBR	$> 1,0$	$> 1,05$	$> 1,0$	$\geq 1,0$
Duración del impulso	2 horas	2 horas hasta el estado estable	Estado estable	1000 s hasta el estado estable
Relación de trabajo	$\sim 70$ %			30 %–50 %
$P_{elec}$	500 MW	200 MW–300 MW (neta)	$\geq 150$ MW (neta)	n/a
Reproducción de tritio	Por determinar; se está contemplando un reactor reproductor sólido y de Li-Pb	Reactor reproductor sólido, tecnología PWR	Reactor reproductor sólido, tecnología PWR	Reactor reproductor sólido, tecnología PWR, ciclo cerrado de tritio a escala DEMO $\sim 1/10$
Configuración magnética	Tokamak	Tokamak	Tokamak	Tokamak
Mantenimiento	Manipulación a distancia	Manipulación a distancia	Manipulación a distancia	Manipulación a distancia

*Cuadro B-1. Misión actual y objetivos de desempeño de los próximos pasos previstos de dispositivos integrados de fusión más allá del ITER. EU DEMO (Europa); JA DEMO (Japón); K - DEMO (República de Corea); CFETR (China);  $P_{elec}$  = potencia eléctrica;  $P_{fus}$  = potencia de fusión;  $Q_{eng}$  = factor técnico de amplificación de potencia; TBR = ratio de reproducción de tritio.*

150. Estos estudios tienen posibilidades de lograr avances notables para el logro de una DEMO a mediados de siglo, aunque se requieren mediciones cuantitativas del progreso esperado respecto de un conjunto completo de mediciones de la disponibilidad para la DEMO a fin de evaluar las lagunas que podrían persistir aun cuando todos estos proyectos se ejecutasen de manera satisfactoria. Cabe señalar que existen lagunas generales con respecto a estas máquinas en sí mismas, especialmente en sus últimas fases, para las cuales se necesita I+D a corto plazo.

151. Existen preguntas abiertas sobre algunas cuestiones clave, incluida la física del plasma en condiciones de quemado y las tecnologías de control, de los materiales y los componentes, la disponibilidad de una maquinaria y las opciones de configuración magnética. En general, se considera que un único dispositivo probablemente no resolverá todas las cuestiones relativas a la DEMO simultáneamente, pero al mismo tiempo tampoco está claro cuántas máquinas se necesitan ni cuán diverso debería ser el conjunto óptimo. Por consiguiente, parecería haber una ventaja importante en aplicar una estrategia internacional de planificación y coordinación de la labor para mejorar la cobertura de las necesidades relativas a la DEMO que actualmente no se abordan adecuadamente, a fin de reducir duplicaciones y tener más fuerza para hacer frente a los contratiempos y retrasos técnicos.

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

### C.1. Aceleradores

#### C.1.1. Aceleradores de protones de alta energía

152. Existe una creciente demanda de aceleradores de protones de alta energía o de aceleradores de haces de iones en diversas esferas, entre ellas la física de partículas, la física nuclear y la física de neutrones, y en la transmutación de desechos nucleares de período largo. Por regla general, estas aplicaciones requieren haces de potencia y energía medias muy elevadas, del orden de los GeV, lo cual sobrepasa considerablemente la capacidad de la mayoría de las instalaciones existentes. La fig. C-1 muestra los proyectos actuales y previstos para ir empujando la potencia de los haces hacia los 10 MW.

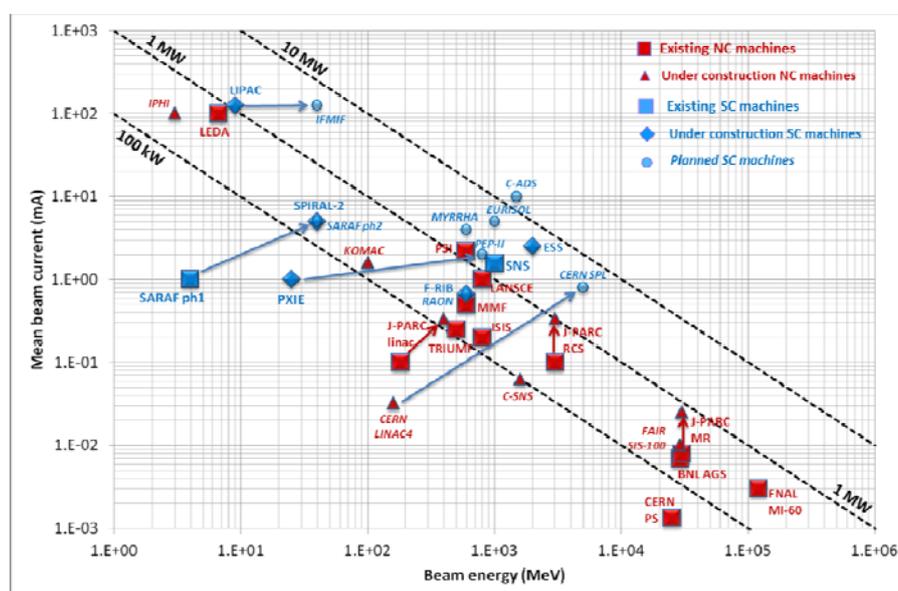


Fig. C-1: Proyectos relacionados con haces de protones/neutrones de alta energía en todo el mundo. Fuente: Jean-Luc Biarrotte, Instituto de Física Nuclear, Orsay (Francia). Reproducida de: BIARROTTE, J.-L., "High power proton/deuteron accelerators", *Proceedings of the 16th International Conference on RF Superconductivity, Paris, France, 2013, Joint Accelerator Conferences Website (2014) 35-41.*

153. Los sistemas accionados por acelerador (SAA) son una solución posible para las instalaciones de transmutación especializadas basadas en un acelerador lineal superconductor de protones multimegavatio con capacidades de fiabilidad mejoradas. El proyecto MYRRHA de Bélgica, cofinanciado por la Unión Europea, entre otros, y el proyecto de SAA de China, son oportunidades para demostrar la tecnología SAA a alta potencia en los próximos 10 ó 15 años.

#### C.1.2. Hoja de ruta para las técnicas de haces de iones

154. Las técnicas de haces de iones basadas en aceleradores abarcan un conjunto de técnicas analíticas y de modificación en las que se dirigen haces energéticos (0,1 a 100 MeV) de partículas cargadas ( $Z = 1, 2$  y superiores) sobre el material que será analizado o modificado. Esas técnicas se han utilizado durante más de 50 años y una gran parte de la física, los datos y la maquinaria subyacentes está consolidada. Los adelantos en las técnicas de haces de iones han dado como resultado contribuciones en muchas esferas (fig. C-2), como por ejemplo en los estudios del clima mediante isótopos cosmogénicos, el desarrollo de materiales mejorados, la comprensión del envejecimiento de los componentes de los reactores, y el desarrollo de la terapia con hadrones, la cual posiblemente tendrá ingentes consecuencias para la salud humana.

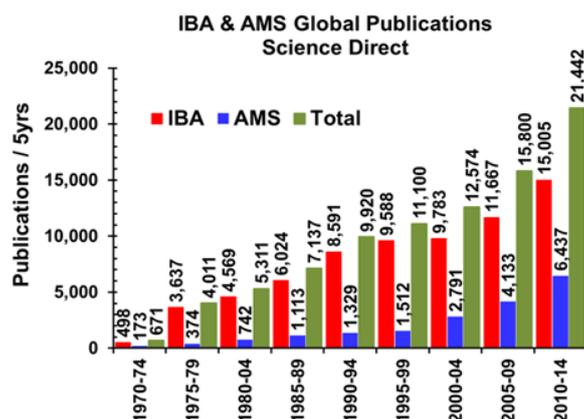


Fig. C-2: Tendencia en aumento del número de publicaciones relacionadas con el uso de las técnicas de haces de iones. (Cortesía de David Cohen, Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear). (IBA: análisis con haces de iones; AMS: espectrometría de masas con aceleradores)

155. El Organismo ha asumido el liderazgo de la coordinación de la elaboración de una hoja de ruta para las técnicas de haces de iones, que incluirá aspectos de planificación estratégica a medio plazo (5 a 15 años) de la ciencia de los aceleradores y las tecnologías conexas. Como resultado de amplios debates mantenidos por expertos internacionales se elaboró el primer borrador, en el que se establecen las prioridades en relación con los adelantos tecnológicos y se define el sistema de medición correspondiente. Se prevé que la hoja de ruta estará terminada en 2016. Los documentos pertinentes están disponibles en el Portal de Conocimientos sobre Aceleradores del Organismo: <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

### C.1.3. Técnicas de rayos X para la caracterización de materiales y la imagenología

156. La radiación sincrotrónica se utiliza desde hace más de 30 años para adquirir conocimientos fundamentales en ciencia multidisciplinaria y para promover las aplicaciones tecnológicas. La cuarta generación de fuentes de luz sincrotrónica abrirá nuevas posibilidades para los científicos. Entre los proyectos actuales figuran MAX IV en Lund (Suecia) (se prevé que entrará en pleno funcionamiento en 2016) y Sirius en el Brasil (puesta en servicio prevista para 2018). Recientes progresos habidos en la tecnología de los aceleradores ofrecen una radiación de baja emitancia y, por tanto, alto brillo y mejor coherencia. Se esperan novedades transcendentales en la esfera de la imagenología por rayos X de alta resolución, por ejemplo la ptiografía, que permite reconstruir imágenes con resoluciones espaciales muy superiores a las que ofrecen las técnicas convencionales. Estas nuevas fuentes sincrotrónicas propician el desarrollo paralelo de detectores de rayos X pixelados avanzados, ya sea de energía dispersiva o de recuento individual.

157. Un buen ejemplo es el Maia, un detector de fluorescencia de rayos X (XRF) con una matriz de 384 diodos de silicio, que ya ha demostrado en líneas de haz de distintos sincrotrones que proporciona imagenología rápida de especiación elemental y química. La imagenología por XRF a escala macroscópica, con resolución espacial adaptada en función del tamaño del haz sincrotrónico incidente, ha encontrado una importante aplicación en el examen de sistemas biológicos y obras de arte (fig. C-3). Avances análogos en la óptica de rayos X y las metodologías pertinentes también pueden ofrecer un análisis con resolución espacial de especímenes de gran superficie cuando se irradian con haces de rayos X relativamente anchos. El concepto de las cámaras de rayos X de campo completo está surgiendo rápidamente como una prometedora metodología de análisis que puede adaptarse en las fuentes sincrotrónicas, las líneas de haz de emisión de rayos X inducida por partículas o los espectrómetros XRF portátiles (fig. C-4).

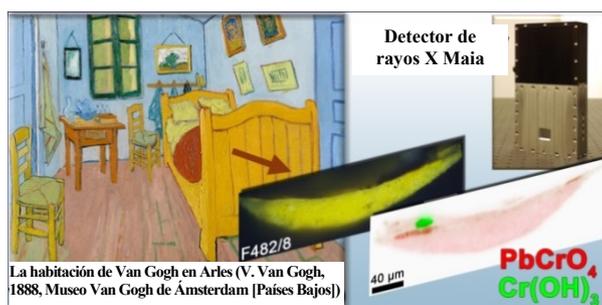


Fig. C-3. Adaptada de: MONICO, L., et al., “Full spectral XANES imaging using the Maia detector array as a new tool for the study of the alteration process of chrome yellow pigments in paintings by Vincent van Gogh”, *J. Anal. At. Spectrom.* **30** (2015) 613–626.

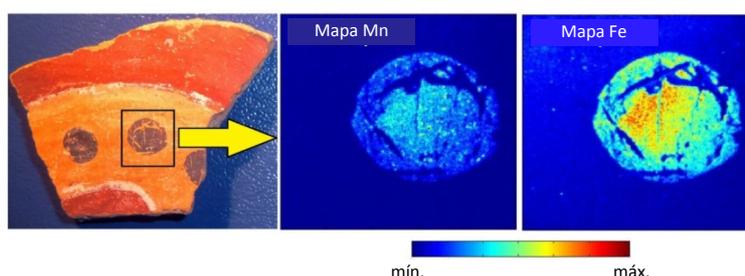


Fig. C-4. Análisis por emisión de rayos X inducida por partículas de campo completo de una decoración negra de manganeso en una cerámica policroma de la cultura Nazca (Perú), realizado en el Instituto Nacional de Física Nuclear de Italia.

#### C.1.4. Técnicas combinadas de haces de iones y de neutrones para determinar las huellas moleculares y de oligoelementos

158. El empleo de las técnicas de haces de iones y de neutrones para el análisis de oligoelementos está bien establecido, y laboratorios acreditados de diversos Estados Miembros que tienen aceleradores o reactores de investigación en funcionamiento ofrecen esos servicios. Entre las aplicaciones figuran el análisis de cabello, uñas, piel y materia vegetal y animal con fines médicos o biomédicos; la determinación de la procedencia de vidrios, productos agrícolas o alimenticios y objetos del patrimonio cultural; la determinación del origen de municiones, residuos de armas de fuego, balas y detonaciones nucleares, y la identificación y el seguimiento de la contaminación ambiental.

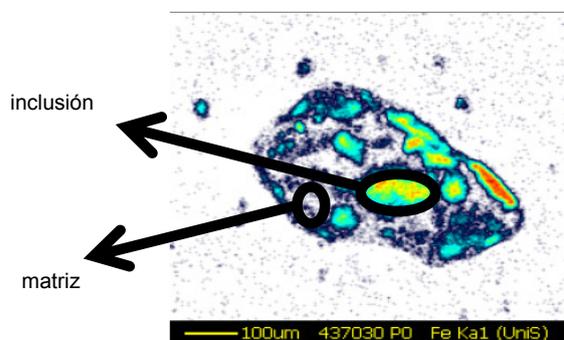


Fig. C-5. Imagen elemental bidimensional de una muestra de cuarzo  $\alpha$  medida con haces de iones focalizados. Las inclusiones de hierro se pueden separar bien de la matriz, permitiendo así determinar la estequiometría en función de la superficie seleccionada, lo cual es muy útil para establecer la procedencia. (Cortesía de Melanie Baley, Universidad de Surrey, Reino Unido)

159. El Organismo está ayudando a elaborar un enfoque multianalítico en el que se aprovechen las sinergias entre los métodos de haces de iones y de haces de neutrones para el análisis molecular y de oligoelementos de alta precisión. Además, se preparará una cartografía bi/tridimensional de alta resolución de oligoelementos en objetos “reales” (p. ej., objetos con superficie rugosa o muestras húmedas) para determinar la procedencia de los materiales (fig. C-5).

## C.2. Reactores de investigación

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

Cuadro C-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo<sup>4</sup>.

Tipo de aplicación <sup>a</sup>	Número de reactores de investigación <sup>b</sup>	Estados Miembros en que se encuentran las instalaciones utilizadas
Enseñanza/capacitación	173	54
Análisis por activación neutrónica	124	54
Producción de radioisótopos	89	44
Irradiación de materiales/combustible	73	28
Radiografía neutrónica	71	40
Dispersión neutrónica	48	32
Transmutación (dopado del silicio)	26	17
Geocronología	27	23
Transmutación (gemas)	18	10
Terapia neutrónica, principalmente I+D	18	12
Otros <sup>c</sup>	128	36

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

<sup>b</sup> De un total de 265 reactores de investigación examinados (246 en funcionamiento y 19 en régimen de parada temporal a noviembre de 2015).

<sup>c</sup> Calibración y ensayo de instrumentación, experimentos de blindaje, mediciones de datos nucleares, visitas públicas y seminarios.

161. Hasta la fecha se han construido 754 reactores de investigación en 67 países, y a 31 de diciembre de 2015 había 246 en funcionamiento en 55 países. La Federación de Rusia tiene el mayor número de reactores de investigación operativos, 63, seguida de los Estados Unidos de América (42), China (17) y Francia (10). Muchos países en desarrollo también tienen reactores de investigación (p. ej., en África funcionan ocho instalaciones). En el mundo hay 58 reactores de investigación que funcionan a niveles de potencia de más de 5 MW y que ofrecen, por tanto, flujos neutrónicos altos para aplicaciones de gran capacidad.

162. Muchos de los reactores de investigación en funcionamiento aún tienen un factor de utilización bajo y la mitad de ellos tiene más de 40 años de antigüedad. Por consiguiente, en su mayoría requieren constante atención en lo que respecta a una minuciosa planificación estratégica de su utilización y a la gestión del envejecimiento, la modernización y la renovación. Los esfuerzos encaminados a mejorar la utilización y a generar ingresos adicionales siguen aumentando. En los dos últimos años, 33 instalaciones

<sup>4</sup> Fuente: Base de Datos de Reactores de Investigación (<http://nucleus.iaea.org/RRDB>) del Organismo.

de reactores de investigación elaboraron planes estratégicos y los presentaron al Organismo para su examen. El Organismo también revisó sus orientaciones sobre la planificación estratégica de los reactores de investigación, que ahora incluyen aspectos de proyectos de reactores de investigación nuevos y de proyectos de trabajos de renovación importantes y presentan numerosos ejemplos de experiencias de buena explotación de las instalaciones. Prosigue la colaboración internacional, entre otras esferas, para promover y mejorar la utilización de los reactores de investigación con fines de enseñanza y capacitación. Un ejemplo de ello es el proyecto de Reactor-Laboratorio por Internet en América Latina y Europa, cuyo objeto es conectar a las universidades con reactores de investigación en funcionamiento dedicados a la enseñanza y la capacitación. En septiembre de 2015 empezó el proyecto en América Latina (con la Argentina como país anfitrión) y en octubre de 2015 lo hizo en Europa y África (con Francia como país anfitrión).

163. Varios países se encuentran en diferentes etapas de la construcción de reactores de investigación nuevos, como instalaciones nacionales clave para el desarrollo de programas e infraestructura de ciencia y tecnología nucleares, comprendida la energía nucleoelectrónica. Se están construyendo nuevos reactores de investigación en la Arabia Saudita, la Argentina, el Brasil, la Federación de Rusia, Francia, la India, Jordania y la República de Corea. Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para construir nuevos reactores de investigación, entre ellos Belarús, Bélgica, el Estado Plurinacional de Bolivia, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y Viet Nam. Otros, como Azerbaiyán, Bangladesh, Etiopía, Ghana, Kuwait, el Líbano, Malasia, Mongolia, Myanmar, Nigeria, la República Unida de Tanzania, Sudáfrica, el Sudán, Tailandia, Tayikistán y Túnez están estudiando la posibilidad de construir reactores de investigación nuevos<sup>5</sup>. Se ha establecido cooperación internacional para la construcción de reactores de investigación multipropósito, como el Reactor Jules-Horowitz en Francia y el reactor MBIR en la Federación de Rusia.

164. Las redes y coaliciones regionales de reactores de investigación propiciadas por el Organismo<sup>6</sup> ayudan a potenciar la cooperación internacional y permiten la ampliación de las comunidades de usuarios y partes interesadas de los reactores de investigación. Además, en 2014 el Organismo puso en marcha un nuevo sistema de colaboración, el Centro Internacional basado en Reactores de Investigación designado por el OIEA (ICERR). En 2015, la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia, en sus centros de investigación de Saclay y Cadarache, fue designada como el primer ICERR y en 2016 se espera recibir nuevas solicitudes de designación de otras organizaciones.

165. A lo largo de 2015, la Oficina de Gestión y Minimización de Materiales del Departamento de Energía de los Estados Unidos, sucesora de la Iniciativa para la Reducción de la Amenaza Mundial (IRAM), siguió desempeñando su misión de reducir al mínimo la utilización de uranio muy enriquecido (UME) en el sector nuclear civil. Al final de 2015, 94 reactores de investigación adscritos a la Oficina habían sido convertidos para utilizar combustible de UPE o se encontraban en régimen de parada confirmado, incluida una instalación de producción de molibdeno 99 que empleaba UME. Entre los éxitos importantes cabe mencionar la carga por Jamaica del núcleo de combustible de UPE en el reactor Slowpoke-2, la descarga del combustible de UME del prototipo de reactor miniatura fuente de neutrones (MNSR) de China como parte de los preparativos para la conversión, y la inserción de conjuntos de ensayo inicial de UPE de uranio-molibdeno rusos en el reactor MIR de Dimitrovgrad para la irradiación. El Organismo siguió prestando apoyo a Ghana en sus esfuerzos relacionados con la conversión y transferencia del núcleo de UME de su reactor MNSR, que previsiblemente se llevará a cabo en 2016.

---

<sup>5</sup> La publicación del Organismo *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.1, Viena, 2012) y una serie de documentos de apoyo están concebidos para ayudar a los Estados Miembros en esta esfera.

<sup>6</sup> El Organismo presta apoyo a varias coaliciones diferentes de reactores de investigación en las regiones de África Central, Asia Central, el Báltico, el Caribe, Europa Oriental y el Mediterráneo y en la Comunidad de Estados Independientes, así como a la Red Mundial de Reactores de Investigación TRIGA.

166. Entre las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido se incluye la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país de origen en el que fue enriquecido. Al final de 2015, el programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense había alcanzado sus objetivos en un 76 %, con la retirada de casi 1300 kg de combustible de UME nuevo y gastado de reactores de investigación. El programa de devolución del UME de origen ruso se ha ejecutado en un 86 %, con la retirada de 2165 kg de combustible de UME nuevo y gastado de reactores de investigación. El UME de origen ruso no irradiado de la instalación de fuente de neutrones Breeder-1 en Tbilisi (Georgia) fue retirado en diciembre de 2015. Con la retirada del combustible de UME líquido irradiado del reactor FOTON IIN-3M en Uzbekistán (fig. C-6), 28 países<sup>7</sup> que tenían UME ya no lo tienen.



*Fig. C-6. Contenedor de transporte con combustible de UME líquido irradiado (izquierda). La carretilla que transporta el bulto con el contenedor de combustible de UME líquido es introducida en el avión de carga en que el combustible del reactor FOTON IIN-3M será repatriado de Uzbekistán a la Federación de Rusia (derecha).*

167. Para la conversión de los reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan combustibles de uranio-molibdeno avanzados y de muy alta densidad que actualmente están en desarrollo. Aunque se han hecho avances sustanciales en este campo, se requerirán más esfuerzos y ensayos, particularmente en relación con los programas de examen de irradiación y post-irradiación, así como en la esfera de las técnicas de manufactura, para llegar a tener combustibles de UPE de alta densidad cualificados disponibles comercialmente.

168. Aunque no hubo ninguna escasez importante de molibdeno 99 en 2015, persisten las dificultades operativas en las instalaciones de procesamiento y en los reactores de investigación más antiguos. Gracias a algunos cambios en la demanda, el aumento de la eficiencia y la diversificación del suministro, la industria gestionó bien las pequeñas interrupciones del servicio no previstas. La conversión de los blancos de UME a UPE en los procesos de producción de isótopos de uso médico continúa, y la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) y NTP Radioisotopes, de Sudáfrica, siguen siendo los principales proveedores de molibdeno 99 basado en UPE. La ANSTO prevé tener terminada su nueva instalación de producción de molibdeno 99 a finales de 2016, lo que le permitirá aumentar su producción semanal a 3500 curios al sexto día. NTP Radioisotopes prosigue con la conversión de sus procesos para utilizar exclusivamente UPE. El Instituto de Radioelementos, en Bélgica, y Mallinckrodt Pharmaceuticals, en los Países Bajos, siguen avanzando en sus esfuerzos en relación con la conversión. Pese a que los Laboratorios Nacionales Canadienses están intentando prolongar las operaciones del reactor NRU hasta el 31 de marzo de 2018, el Canadá tiene previsto dejar de producir de manera ordinaria molibdeno 99 para el reactor NRU el 31 de octubre de 2016. El reactor BR2 de Bélgica, uno de los principales irradiadores de molibdeno 99, entró en régimen de parada en

---

<sup>7</sup> Más Taiwán (China).

febrero de 2015 para realizar amplias actividades de mantenimiento y modernización a fin de preparar la instalación para una prórroga de 10 años de su licencia de explotación después de 2016. La reanudación de las operaciones está prevista para julio de 2016. La comunidad internacional de molibdeno 99 ha trabajado con éxito en la adaptación del calendario de planificación de la producción para tener en cuenta esta prolongada interrupción del servicio.

## **D. Nuevas aplicaciones industriales de las tecnologías de la radiación**

169. Las tecnologías de la radiación continuamente van siendo adaptadas para su uso en aplicaciones industriales, ya sea la localización de averías en una planta de fabricación, la mejora de la calidad en la producción de materiales de alto valor o la mitigación de la contaminación de los efluentes industriales. En la presente sección se describen las tecnologías de la radiación que han tenido una clara repercusión en los últimos años y han hecho posibles aplicaciones a escala industrial.

### **D.1. Tecnologías de la radiación en la industria y la ingeniería**

170. La activación en capa fina es una técnica nuclear que ofrece la posibilidad de investigar en línea el desgaste o la corrosión a una escala de micrómetros a nanómetros en sectores tecnológicamente avanzados, como la industria automovilística, la industria de la energía y la metalurgia. En un contexto no industrial, las costas y el lecho marino experimentan procesos de erosión, transporte, sedimentación y consolidación. Los trazadores basados en radioisótopos y las fuentes selladas a menudo han demostrado ser instrumentos irremplazables para los estudios sobre el transporte de sedimentos en medios marinos, ya que proporcionan parámetros importantes que permiten una mayor eficacia en el diseño, el mantenimiento y la optimización de las estructuras de ingeniería civil y pueden aportar información útil para mejorar la protección y la gestión de los recursos costeros.

#### **D.1.1. La activación en capa fina para la medición del desgaste, la erosión y la corrosión de materiales**

171. Las técnicas nucleares se utilizan ampliamente en la investigación de fenómenos físicos y químicos complejos, como el desgaste, la transferencia de masa, la corrosión y la erosión. Es consabido que los procesos de degradación, como el desgaste, la corrosión y la erosión, influyen notablemente en la fiabilidad del equipo industrial, los sistemas de transporte, las centrales nucleares y las centrales eléctricas convencionales, y las tuberías, por ejemplo. En consecuencia, el desarrollo de métodos eficaces para la detección, medición y vigilancia de los procesos mencionados tiene gran importancia. Unos métodos apropiados de vigilancia podrían evitar accidentes peligrosos durante las operaciones de las instalaciones industriales o los vehículos de transporte, así como evitar pérdidas de producción por rotura de la maquinaria.

172. Cuando las superficies no son fácilmente accesibles o están ocultas por estructuras superpuestas, las técnicas nucleares proporcionan la manera más eficaz de medir y vigilar el desgaste y la corrosión. La activación en capa fina, en la que se activan mediante partículas cargadas solo las capas superficiales de las partes deseadas de la maquinaria, ofrece un medio para vigilar los componentes clave, por inaccesibles que estén. Los bajos niveles de actividad empleados permiten una fácil manipulación de la muestra y puede alcanzarse una elevada sensibilidad de medición.

173. Hay constantes avances en la aplicación de técnicas de trazadores para la evaluación del desgaste y la corrosión de la maquinaria en diversos sectores de la industria moderna, sobre todo

gracias a los adelantos en los métodos utilizados para el marcado radiactivo del componente objeto de investigación. Se han desarrollado diferentes métodos de marcado para medir la pérdida de material a escala nanométrica con actividad relativamente baja, como la activación en capa ultrafina, que se basa en la implantación por retroceso de núcleos pesados radiactivos producidos por reacciones nucleares y permite medir la pérdida de superficie con una sensibilidad de apenas unos nanómetros.

### **D.1.2. Tecnologías de la radiación para la investigación del transporte de sedimentos**

174. La investigación del transporte de sedimentos en mares y ríos es crucial para la ingeniería civil y la protección y gestión del litoral. La costa y el lecho marino son regiones dinámicas en que los sedimentos experimentan períodos de erosión, transporte, sedimentación y consolidación. Entre las principales causas de erosión en las playas están las tormentas y actividades humanas como la construcción de diques y muelles y el dragado de las desembocaduras de los ríos. Todas estas acciones perturban el flujo natural de los sedimentos. En la actualidad, los factores artificiales se están agravando progresivamente por los efectos del cambio climático. Aunque es posible que muchas políticas y prácticas actuales estén acelerando el proceso de erosión de las playas, se dispone de opciones viables para mitigar ese daño y asegurar la sostenibilidad de las costas.

175. Las técnicas nucleares pueden contribuir a la investigación de la dinámica de los sedimentos y al establecimiento de parámetros importantes que permitan mejorar el diseño, el mantenimiento y la optimización de las estructuras de ingeniería civil. El uso de radioisótopos en trazadores y fuentes selladas se ha revelado particularmente útil para los estudios sobre el transporte de sedimentos.

176. Los radiotrazadores son más sensibles y precisos que los trazadores convencionales y constituyen el único método inequívoco para la evaluación directa en tiempo real de las vías de transporte de sedimentos. Grupos de investigación en numerosos países han desarrollado diversas técnicas de rastreo y vigilancia de los sedimentos mediante el uso de radiotrazadores.

177. Además de los radiotrazadores, las técnicas de fuentes selladas pueden aportar información sobre la densidad de los sedimentos depositados en canales de navegación o dársenas, así como sobre la concentración de los sedimentos que circulan en suspensión.

178. Dos esferas típicamente problemáticas en que las técnicas de radiotrazadores y fuentes selladas pueden hacer una contribución importante son: la gestión de las zonas litorales sometidas a erosión y de las líneas de costa en retroceso a largo plazo, que suelen dar lugar a la pérdida de playa; y el tratamiento de la selección inadecuada de vertederos para las operaciones de dragado en los puertos, que puede causar el retorno de los materiales del vertedero al canal dragado.

179. Dado que los beneficios ambientales, económicos y sociales de la aplicación de técnicas de radiotrazadores y fuentes selladas para el rastreo y la vigilancia de sedimentos son enormes, el Organismo facilita la transferencia de tecnología y ofrece a los Estados Miembros capacitación en varias de esas técnicas.

180. En la actualidad, la modelización de la dinámica de fluidos (hidrodinámica) computacional es un instrumento de uso común para la gestión de los sistemas naturales y cada vez se utiliza más para el estudio del destino y el comportamiento de las partículas y los contaminantes. Las técnicas de radiotrazadores se suelen utilizar para validar modelos hidrodinámicos a fin de aumentar la confianza en el valor predictivo del modelo. La experimentación con radiotrazadores y la modelización numérica son métodos complementarios para el estudio de sistemas complejos. Los datos de trazadores se basan en la observación directa, pero se limitan al componente del sistema que ha sido marcado y a un segmento restringido de espacio y tiempo. Los modelos numéricos pueden, en teoría, abarcar todos los parámetros importantes, pero están limitados por sus supuestos básicos y por la potencia de cálculo disponible. De manera individual, ambos enfoques tienen limitaciones, pero juntos ofrecen un método

poderoso de investigación de sistemas complejos. En los últimos años ha quedado claro que el uso sinérgico en esta esfera de la modelización y los estudios con radiotrazadores puede contribuir significativamente a la solución de problemas complejos de los sistemas naturales.

## **D.2. Tecnologías de la radiación para el desarrollo de productos y procesos ecológicos**

181. Diversos sectores industriales se están esforzando por ser más respetuosos con el medio ambiente gracias a la fabricación de productos de mayor rendimiento con menor consumo de energía. Las técnicas de tratamiento con radiaciones tienen una exitosa historia de contribución al desarrollo de productos y procesos ecológicos innovadores. El presente apartado se centra en productos nuevos tratados con radiación, como materiales de escala nanométrica sintetizados por radiación de diversas formas y tamaños (nanopartículas, nanofibras, nanoporos), que se prevé utilizar para la elaboración de envases activos para alimentos y materiales para vendajes, así como en dispositivos de administración de fármacos. La preocupación por la contaminación ambiental asociada a los productos químicos utilizados tradicionalmente en la industria del revestimiento y el curado es el principal motor de los esfuerzos encaminados a aprovechar la radiación de haces de electrones de baja energía para la fabricación de estos productos.

### **D.2.1. Materiales a escala nanométrica tratados con radiación**

182. La iniciación de reacciones por radiación (polimerización, reticulación, degradación controlada e injerto) es un poderoso instrumento para la síntesis o modificación de materiales a escala nanométrica, ya que este método permite crear nuevas propiedades a cualquier temperatura y sin aditivos ni residuos tóxicos que posteriormente serían difíciles y caros de eliminar. Esto es especialmente ventajoso cuando el producto está destinado a aplicaciones médicas. Además, estos materiales pueden elaborarse a partir de desechos: por ejemplo, se han fabricado con éxito nanotubos de carbono a partir de bolsas de plástico desechadas.

#### **D.2.1.1. Aplicaciones médicas**

183. Los progresos en la elaboración y la adaptación de nanopartículas se han traducido en una gama de productos que pueden ser ampliamente utilizados en la atención sanitaria y que registran una fuerte demanda. Se ha propuesto la aplicación médica de muchos sistemas nanométricos, como los puntos cuánticos, las nanoesferas orgánicas e inorgánicas, los dendrímeros, los liposomas y las nanopartículas poliméricas. Los nanogeles — redes de polímeros reticulados de dimensiones nanométricas — presentan ventajas únicas en cuanto a su forma flexible, amplia superficie con numerosos sitios de conjugación y espacio interno o bolsillos para portar fármacos que pueden liberarse en respuesta a ciertos estímulos, así como la posibilidad de ser interiorizados por las células humanas. La radiosíntesis de esos nanogeles se realizó por primera vez en Polonia y el método fue adoptado rápidamente por muchos investigadores de diversos países del mundo, como la Argentina, el Brasil, Italia, Tailandia y Turquía, entre otros. Estos nanogeles pueden elaborarse utilizando polímeros sintéticos o naturales, además de biomoléculas como proteínas y péptidos. Además de su uso como portadores de carga útil de fármacos específicos que serán liberados *in situ* para combatir diversas enfermedades, las nanopartículas se están incorporando a los apósitos para heridas a fin de acelerar la curación y combatir las infecciones. La degradación por radiación controlada se utiliza con éxito para elaborar membranas poliméricas nanoporosas, que además pueden funcionalizarse para preparar membranas que puedan filtrar y separar selectivamente diversas biomoléculas.

### **D.2.1.2. Materiales avanzados de revestimiento y envasado de alimentos**

184. Según un estudio reciente, el tiempo de conservación, la frescura y la calidad de los alimentos constituyen una prioridad para los consumidores.<sup>8</sup> Para responder a esas necesidades se está desarrollando el envasado “activo” o “inteligente”. Por ejemplo, las películas con propiedades superiores de barrera de gases, que impiden la entrada de oxígeno en el envase y la salida de gases inertes de él, se han mostrado eficaces para prolongar la vida del producto sin que este pierda frescura. Este tipo de películas pueden fabricarse incorporando nanopartículas específicas a la película, que también podría contener enzimas, agentes antibacterianos y otros componentes que ayuden a controlar la degradación y el deterioro de los alimentos. Este tipo de envase para alimentos biológicamente activo se preparó en Egipto a partir de acetato de celulosa mediante la incorporación de nanopartículas de plata, al tiempo que se han fabricado envases menos permeables al oxígeno y el vapor de agua a partir de películas de policaprolactona y quitosano mediante la adición de óxido de grafeno. Científicos egipcios están trabajando también en la producción de envases inteligentes para alimentos de origen marino mediante la incorporación de nanofibras de polianilina a películas de poliprolactona. Estos envases cambian de color al interactuar con el vapor que emana de los alimentos de origen marino en descomposición, indicando así claramente la frescura o el deterioro del alimento. En el Canadá, se añade nanocelulosa a envases hechos con materiales de origen biológico tanto para reforzarlos como para hacer que el material responda a posteriores modificaciones químicas para adaptarse a necesidades de envasado específicas.

### **D.2.2. Curado por radiación**

185. La industria de la impresión y el revestimiento en todo el mundo está buscando procedimientos más inocuos para el medio ambiente que utilicen menos disolventes o ninguno en absoluto para evitar la contaminación, así como la migración de subproductos tóxicos degradados a los bienes de consumo. La Directiva de la Comisión Europea 2007/19/EC, de 2007 — cuarta modificación de la Directiva 2002/72/EC, conocida comúnmente como “Directiva sobre plásticos” —, por la que se estableció un nivel máximo de 10 partes por mil millones para la migración de sustancias no autorizadas a los alimentos, es un ejemplo de las medidas recientes que han inducido a la industria del envasado a buscar nuevas tecnologías. La creciente demanda de procesos y materiales respetuosos con el medio ambiente que puedan sustituir a aquellos que son nocivos ha sido uno de los motivos principales de que empezaran a utilizarse aceleradores de haces de electrones de baja energía con energías inferiores a 300 keV para la industria del revestimiento. El uso de monómeros y oligómeros que pueden ser curados por radiación en revestimientos, tintas y adhesivos, que polimerizan y reticulan, evita el uso de compuestos orgánicos volátiles para el curado, de modo que permiten que la industria del revestimiento y otras industrias conexas cumplan los requisitos de aire limpio al lograr emisiones significativamente inferiores de contaminantes atmosféricos tóxicos durante la producción, así como niveles mucho más bajos de agentes químicos tóxicos en el producto. Además de estas ventajas, los productos y procesos curados por haces de electrones ahorran energía y espacio, al tiempo que aumentan la calidad y la productividad.

186. La aplicación más amplia de la tecnología de curado por radiación en las industrias de impresión y revestimiento necesita constantes avances en la tecnología de los aceleradores para hacer que la utilización de la tecnología de haces de electrones sea comercialmente viable a escala industrial. El reciente desarrollo de una nueva generación de emisores de haces de electrones altamente compactos y fáciles de manejar con un rango de voltaje de aceleración de 80 a 200 kV y anchuras de tratamiento de

---

<sup>8</sup> WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME, Consumer Attitudes to Food Waste and Food Packaging, Banbury (2013).

hasta 60 cm tiene posibilidades de seguir fomentando la utilización de esta tecnología, ya que permitirá el desarrollo, la optimización y la evolución continua de nuevos productos y procesos en una amplia gama de aplicaciones, como el curado y el desarrollo de materiales mediante reticulación.

## **E. Avances en tecnología de imagenología médica**

187. Los avances en la tecnología de imagenología médica para estudiar la composición corporal permiten cuantificar parámetros como la masa grasa, la masa magra y la densidad mineral ósea, así como la masa de órganos y tejidos concretos, por ejemplo, la masa adiposa, muscular y visceral. El estudio de la composición corporal se utiliza en una serie de aplicaciones que van desde el seguimiento del estado físico hasta el estado de las enfermedades y la gestión de los riesgos de enfermedades. Hay cada vez más pruebas de que los distintos elementos de la composición corporal influyen considerablemente en el riesgo de padecer enfermedades crónicas, la evolución de las enfermedades, la respuesta a los tratamientos y los desenlaces médicos. De ahí el gran interés por el desarrollo en curso de instrumentos para estudiar la composición corporal y modelos de riesgo para prever desenlaces adversos. Actualmente existen tres modalidades de imagenología de uso generalizado en lo que respecta al estudio de la composición corporal: la absorciometría de rayos X de energía dual (DXA), la tomografía computarizada cuantitativa (QCT) y la imagenología por resonancia magnética (MRI).

### **E.1. Avances recientes en la tecnología de imagenología para el estudio de la composición corporal**

#### **E.1.1. La composición corporal como indicador de salud**

188. La prevalencia del sobrepeso y la obesidad a nivel mundial ha registrado un crecimiento inquietante en los últimos decenios. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en todo el mundo hay casi 2000 millones de adultos con sobrepeso, de los cuales más de 600 millones son obesos, cifra que se ha duplicado desde 1980.<sup>9</sup> Hace mucho que estas afecciones metabólicas han alcanzado proporciones de epidemia en la población adulta e infantil. La obesidad se ha relacionado directamente con varias enfermedades crónicas como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, la artrosis y el cáncer, que afectan gravemente la calidad y la esperanza de vida. Se prevé que los costos económicos del sobrepeso y la obesidad se dupliquen cada diez años y ocasionen aumentos significativos del gasto total en atención sanitaria.

189. Se insiste mucho en contar con instrumentos accesibles de evaluación de los riesgos para la salud relacionados con la obesidad. Se trata principalmente de métodos sin imágenes que son asequibles y fáciles de utilizar, entre ellos métodos para la obtención de índices de obesidad basados en diversas combinaciones de altura y peso como el índice de masa corporal (IMC), el índice de forma corporal, el índice de redondez corporal e indicadores antropométricos de la obesidad como el perímetro de la cintura y la proporción entre la cintura y la cadera. No obstante, para dilucidar los mecanismos etiológicos subyacentes relativos a la composición corporal y la enfermedad, con frecuencia se precisan medidas corporales más complejas. Por ejemplo, si bien la OMS clasifica el sobrepeso y la obesidad a partir del IMC, esta medida no recoge información sobre la cantidad relativa de tejido graso y magro, ni ofrece información sobre la distribución de la adiposidad en el cuerpo, si bien se ha demostrado que ambos factores están relacionados de manera independiente con el síndrome

---

<sup>9</sup> OMS, Obesidad y sobrepeso, Nota descriptiva N° 311, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/>, actualizada en enero de 2015.

metabólico. Otro paso más en la cuantificación de la composición corporal es la utilización de métodos que permiten medir los compartimentos de masa grasa y magra de todo el cuerpo, como el análisis por impedancia bioeléctrica y la pletismografía por desplazamiento de aire. Sin embargo, con ellos no es posible aislar los distintos compartimentos de los tejidos. Se necesitan métodos de imagenología realmente bidimensionales y tridimensionales para subdividir el cuerpo por tipos de tejidos y regiones anatómicas espaciales, e investigar la relación entre enfermedad, morbilidad y mortalidad. El uso de la absorciometría de rayos X de energía dual, la tomografía computarizada cuantitativa y la imagenología por resonancia magnética está muy extendido en todo el mundo para el estudio detallado de la composición corporal. Más recientemente, la exploración óptica tridimensional de superficie ha surgido como un nuevo instrumento para el análisis de la composición corporal.<sup>10</sup>

### **E.1.2. Avances en la absorciometría de rayos X de energía dual (DXA)**

190. La absorciometría de rayos X de energía dual es una modalidad muy exacta y precisa para medir la densidad mineral ósea, la masa ósea, la masa grasa, la masa magra de tejidos blandos y el porcentaje de grasa. El método consiste en la obtención simultánea de imágenes a dos niveles distintos de energía de rayos X. Aprovechando las singulares características de atenuación de los distintos tipos de tejidos, la exploración por DXA se utiliza para calcular las propiedades de densidad de una zona a partir de imágenes bidimensionales. En los modelos DXA, la densidad mineral ósea es igual a la masa mineral ósea dividida entre la superficie ósea proyectada en  $\text{g/cm}^2$ . La masa grasa es la masa lipídica (triglicéridos, membranas de fosfolípidos, etc.), puesto que todos los lípidos tienen características de atenuación de rayos X similares. Hasta hace poco, las mediciones con DXA no podían distinguir entre tipos de tejido como la piel, el músculo, el hígado y los tejidos adiposos subcutáneos y viscerales. Si bien esto sigue siendo cierto en su mayor parte, la información sobre los tejidos adiposos subcutáneos y viscerales del abdomen inferior se obtiene actualmente empleando un algoritmo de estimación especializado. Asimismo, la medición del contenido de hierro en el hígado mediante DXA ha demostrado su precisión en relación con los patrones de referencia.<sup>11</sup> En la fig. E-1 se muestra un ejemplo típico de informe DXA.

---

<sup>10</sup> LEE, S.Y., GALLAGHER, D., Assessment methods in human body composition, *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* **11** (2008) 566–572.

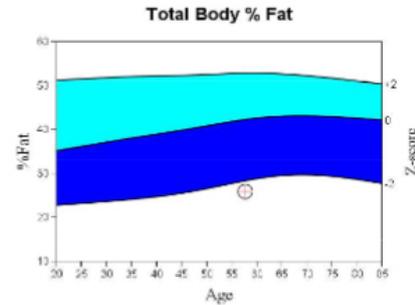
<sup>11</sup> SHEPHERD, J.A., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry with serum ferritin predicts liver iron concentration and changes in concentration better than ferritin alone, *J. Clin. Densitom.* **13** (2010) 399–406.

**HOLOGIC TEST**  
4776 S W 8TH Street  
Bedford, MA 01730

Telephone: 781-999-7300

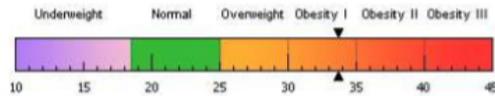
Fax: 781-260-0671

Name: sample, patient	Sex: Female	Height: 54.0 in
Patient ID: 987654	Ethnicity: White	Weight: 140.0 lb
DOB: February 13, 1957	Menopause Age: 50	Age: 57



Source: 2008 NHANES White Female

World Health Organization Body Mass Index Classification  
BMI = 33.8 WHO Classification Obesity I



BMI has some limitations and an actual diagnosis of overweight or obesity should be made by a health professional. Obesity is associated with heart disease, certain types of cancer, type 2 diabetes, and other health risks. The higher a person's BMI is above 25, the greater their weight-related risks.

**Body Composition Results**

Region	Fat Mass (g)	Lean + BMC (g)	Total Mass (g)	% Fat	%Fat Percentile YN	AM
L. Arm	984	2066	3050	32.3	20	5
R. Arm	1094	2123	3217	34.0	28	8
Trunk	6750	20123	26874	25.1	20	4
L. Leg	2354	7055	9409	25.0	1	1
R. Leg	2525	7258	9783	25.8	1	1
Subtotal	13707	38625	52333	26.2	7	1
Head	886	3091	3978	22.3		
<b>Total</b>	<b>14593</b>	<b>41717</b>	<b>56310</b>	<b>25.9</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
Android (A)	1119	2853	3972	28.2		
Gynoid (G)	2626	6327	8953	29.3		

Scan Date: October 16, 2014 ID: A10161401  
 Scan Type: a Whole Body  
 Analysis: October 16, 2014 15:28 Version 13.5.1  
 Operator: mjd  
 Model: QDR Workstation (S/N 061263)  
 Comment:

**Adipose Indices**

Measure	Result	Percentile YN	AM
<b>Total Body % Fat</b>	<b>25.9</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
Fat Mass/Height <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	7.76	37	13
Android/Gynoid Ratio	0.96		
% Fat Trunk/% Fat Legs	0.99	88	70
Trunk/Limb Fat Mass Ratio	0.97	78	47
Est. VAT Mass (g)	145		
Est. VAT Volume (cm <sup>3</sup> )	156		
Est. VAT Area (cm <sup>2</sup> )	30.0		

**Lean Indices**

Measure	Result	Percentile YN	AM
Lean/Height <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	20.9	97	96
Appen. Lean/Height <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	9.21	97	96

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue  
 YN = Young Normal  
 AM = Age Matched

TBAR1058 - NHANES BCA calibration

**HOLOGIC®**

Fig. E-1. Informe típico de composición corporal de un sistema DXA de la empresa Hologic. Se dan resultados de la composición corporal de muchas subregiones, como los brazos, las piernas y el tronco. Los adelantos recientes comprenden la facilitación de información sobre la superficie, el volumen y la masa del tejido adiposo visceral en el abdomen inferior, así como otros índices sobre la masa magra, como el índice de masa magra de las extremidades. (Cortesía: Hologic)

191. La dosis de radiación en la DXA es muy baja, comparable a la dosis de radiación de fondo recibida en un día (~ 8 µSV). Sin embargo, si el experto en tecnología tiene una capacitación adecuada, la precisión del análisis y el reanálisis mediante DXA es muy alta: 1,0 % del coeficiente de desviación, o una precisión mayor, para el porcentaje de grasa corporal en exploraciones repetidas de

la misma persona.<sup>12,13</sup> Además de información sobre todo el cuerpo, la DXA puede ofrecer información sobre la grasa, el tejido magro blando y los compartimentos de masa mineral ósea de subregiones anatómicas como los brazos, las piernas y el torso. Se trata de algo que no puede conseguirse con métodos más simples no basados en la imagenología (análisis por impedancia bioeléctrica, pletismografía por desplazamiento de aire, etc.). No obstante, la DXA tiene limitaciones. Una de ellas es que el modelo tricompartmental no aísla de manera clara el agua de la masa magra de la proteína funcional. Si bien la DXA no utiliza expresamente supuestos de hidratación para calcular las masas de la composición corporal, los cambios en el estado de hidratación se interpretan como un cambio en la masa del tejido magro. Puesto que el tejido adiposo contiene además alrededor de un 15 % de agua en peso, la observación del cambio en la masa muscular se desajusta cuando cambia también la adiposidad. La absorciometría de rayos X de energía dual es una modalidad especializada de imagenología que no suele estar disponible en los sistemas de rayos X de uso general porque se precisa un filtro especial para el haz y un registro espacial cuasiperfecto de las dos atenuaciones.

192. La absorciometría de rayos X de energía dual se utiliza más en los ensayos clínicos que otros métodos de estudio de la composición corporal. Su dosis es baja en comparación con la tomografía computarizada (TC) de cuerpo entero y es una técnica económica en comparación con la MRI. Las medidas sobre el porcentaje de grasa corporal obtenidas por DXA guardan una gran correlación con las obtenidas mediante TC y MRI ( $r > 0,99$ )<sup>14</sup>, aunque son más precisas. Dependiendo del modelo de escáner y de la talla del paciente, la duración de las exploraciones de cuerpo entero oscilan entre los tres y los diez minutos. Es fácil realizar sobre el terreno una calibración cruzada de los sistemas de DXA cuya fabricación y modelo sean similares mediante materiales comunes de maniqués biomiméticos como el ácido esteárico y el agua. La calibración cruzada de modelos solo puede realizarse actualmente mediante ecuaciones de ajuste que eliminen sesgos. Asociando maniqués y ecuaciones de ajuste es posible agrupar los datos de todos los centros clínicos. Por último, se han emprendido iniciativas a gran escala a fin de ofrecer muestras representativas sobre salud metabólica y nutrición para países concretos, comprendidos los exámenes nacionales de la salud y la nutrición realizados en los Estados Unidos de América y en la República de Corea.

### **E.1.2.1 Regiones de interés especiales en relación con la DXA**

193. Desde los inicios de la DXA, las subregiones definidas en las exploraciones de cuerpo entero sobre las que se notifica respecto de los tejidos blandos han sido los brazos, las piernas, el tronco y la cabeza. No obstante, en los últimos años se ha realizado una labor progresiva para poder ofrecer información sobre regiones especiales, además de sobre esas regiones anatómicas. Los sistemas de absorciometría de rayos X de energía dual pueden estimar la grasa adiposa visceral, bien como superficie de una sección transversal, bien como volumen de tejido.<sup>15,16</sup> Estas estimaciones de los tejidos adiposos viscerales se obtienen restando las estimaciones de la grasa subcutánea subyacente de la grasa androide total. La correlación entre las medidas de los tejidos adiposos viscerales obtenidas de la DXA y la TC es muy elevada ( $r > 0,90$ ).

---

<sup>12</sup> POWERS, C., FAN, B., BORRUD, L.G., LOOKER, A.C., SHEPHERD, J.A., Long-term precision of dual-energy X-ray absorptiometry body composition measurements and association with their covariates, *J. Clin. Densitom.* **18** (2013).

<sup>13</sup> TOOMBS, R.J., DUCHER, G., SHEPHERD, J.A., DE SOUZA, M.J., The impact of recent technological advances on the trueness and precision of DXA to assess body composition, *Obesity* **20** (2012) 30–39.

<sup>14</sup> KULLBERG, J., et al., Whole-body adipose tissue analysis: comparison of MRI, CT and dual energy X-ray absorptiometry, *Br. J. Radiol.* **82** (2009) 123–130.

<sup>15</sup> MICKLESFIELD, L.K., GOEDECKE, J.H., PUNYANITYA, M., WILSON, K.E., KELLY, T.L., Dual-energy X-ray performs as well as clinical computed tomography for the measurement of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1109–1114.

<sup>16</sup> KAUL, S., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry for quantification of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1313–1318.

### **E.1.2.2 Exploración de pacientes obesos mediante DXA**

194. La exploración de personas de mucho peso mediante un sistema DXA ha entrañado dificultades en el pasado debido a los límites de peso del escáner y las dimensiones de la mesa de exploración. Recientemente se han aumentado los límites de peso de las mesas de exploración por DXA hasta 227 kg en algunos modelos. Existen también modos de exploración especializados con dosis ligeramente superiores para pacientes obesos. En los casos en que sea difícil acomodar a un paciente obeso en la zona del escáner pueden utilizarse los protocolos de análisis denominados “escáner hemisférico” o “escáner de reflexión”, en los que se procede a la colocación horizontal desplazada del paciente en la mesa. La composición del brazo o la pierna que queda fuera de la mesa se determina a continuación valiéndose de la extremidad correspondiente que ha sido plenamente explorada.

195. La calidad de la exploración, el análisis y la interpretación son de suma importancia para obtener resultados exactos de la composición corporal. Los maniqués diseñados específicamente para controlar la calibración de los sistemas DXA están disponibles en el mercado. Estos maniqués se han utilizado para realizar correcciones de calibración longitudinales y calibraciones cruzadas entre sistemas similares. Sin embargo, ninguno de los maniqués fabricados hasta la fecha han demostrado ser adecuados para la calibración cruzada entre marcas y modelos distintos.

### **E.1.3. Avances en la tomografía computarizada cuantitativa y en la imagenología por resonancia magnética**

196. Cuando se necesitan datos sobre la composición o el volumen de un órgano, con independencia del tejido circundante, es preciso recurrir a un método de imagenología tridimensional. La tomografía computarizada (TC) y la imagenología por resonancia magnética (MRI) son métodos comunes disponibles clínicamente que permiten aislar órganos como músculos concretos, el corazón, el cerebro, el hígado, etc. Los órganos se aíslan de los tejidos circundantes mediante cortes tomográficos del cuerpo. Las principales limitaciones de la MRI y la TC es la accesibilidad limitada en zonas de escasos recursos, el costo elevado en relación con otros métodos y, en el caso de la TC, la dosis significativa que recibe el paciente. Sin embargo, los sistemas clínicos de gran calibre permiten explorar cualquier parte del cuerpo y se adaptan a muchos tamaños corporales distintos. La cuantificación de la grasa y el tejido muscular puede llevarse a cabo con diversas técnicas, como la absorciometría (TC), el modo de saturación (MRI) o la segmentación de tejidos (TC y MRI).

197. La tomografía computarizada es la principal técnica empleada en el estudio de depósitos específicos de grasa localizada. Su aplicación de investigación más común con respecto al estudio de la composición corporal es la cuantificación de la grasa subcutánea, visceral y hepática. La TC estima con gran exactitud la grasa visceral y la grasa abdominal total. La reproducibilidad de la técnica también es excelente, con una variabilidad de <1 % entre mediciones repetidas.

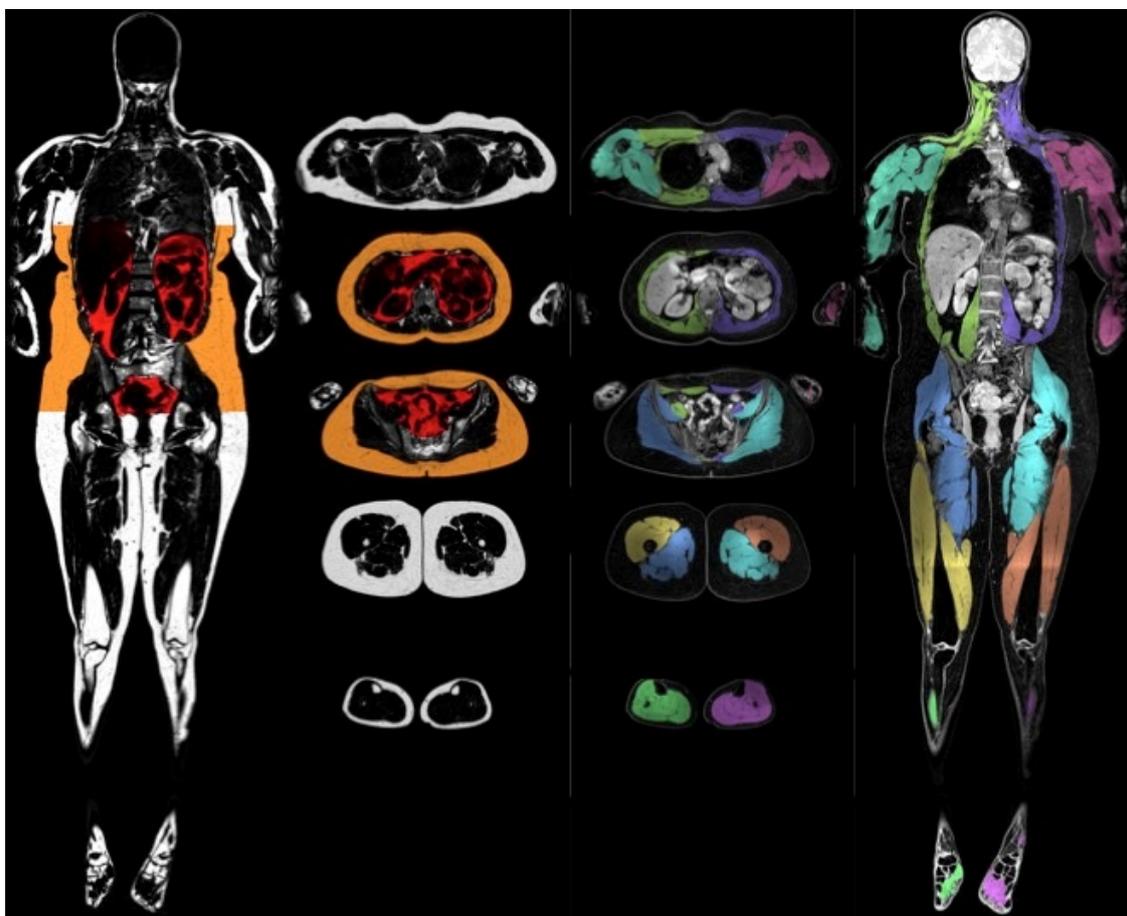
198. En los estudios con adultos, la TC es la técnica preferida por su rapidez, disponibilidad y facilidad para ejecutar el protocolo y realizar exploraciones. La tomografía computarizada se calibra también de conformidad con patrones absolutos de atenuación. La imagenología por resonancia magnética es el método preferido en las investigaciones con niños y adolescentes en que las consideraciones relativas a la dosis son importantes.<sup>17</sup> Recientemente se han demostrado complicados algoritmos para el análisis de segmentación automatizada de exploraciones MRI de cuerpo entero,<sup>18</sup> que han implantado distintas empresas. En la fig. E-2 se muestra un ejemplo. La exploración MRI que aparece en esa figura se obtuvo en menos de diez minutos mediante un protocolo de exploración de

---

<sup>17</sup> OWENS, S., et al., Visceral adipose tissue and cardiovascular risk factors in obese children, *J. Pediatr.* **133** (1998) 41-45.

<sup>18</sup> KARLSSON, A., et al., Automatic and quantitative assessment of regional muscle volume by multi-atlas segmentation using whole-body water-fat MRI, *J. Magn. Reson. Imaging* **41** (2015) 1558-1569.

Dixon de tres puntos (en que se separan la grasa y el agua) y muestra segmentados por colores todos los principales grupos de músculos, la grasa visceral y la grasa subcutánea. Esto permite dar información sobre el volumen de los órganos, la masa de agua y la masa grasa.



*Fig. E-2. Ejemplo de segmentación automatizada de una imagen obtenida por resonancia magnética, en la que se muestran por separado las grasas (izquierda) y el agua (derecha). Los tejidos adiposos abdominales subcutáneo y visceral están marcados en naranja y rojo, respectivamente, y aparecen superpuestos en la imagen de las grasas. En la imagen del agua aparecen superpuestos en diferentes colores diez grupos de músculos principales. La segmentación se hizo de forma automática. Se precisaron seis minutos para obtener la imagen de cuerpo entero. (Cortesía: Olof Dahlqvist Leinhard, Universidad Linköping, Suecia)*

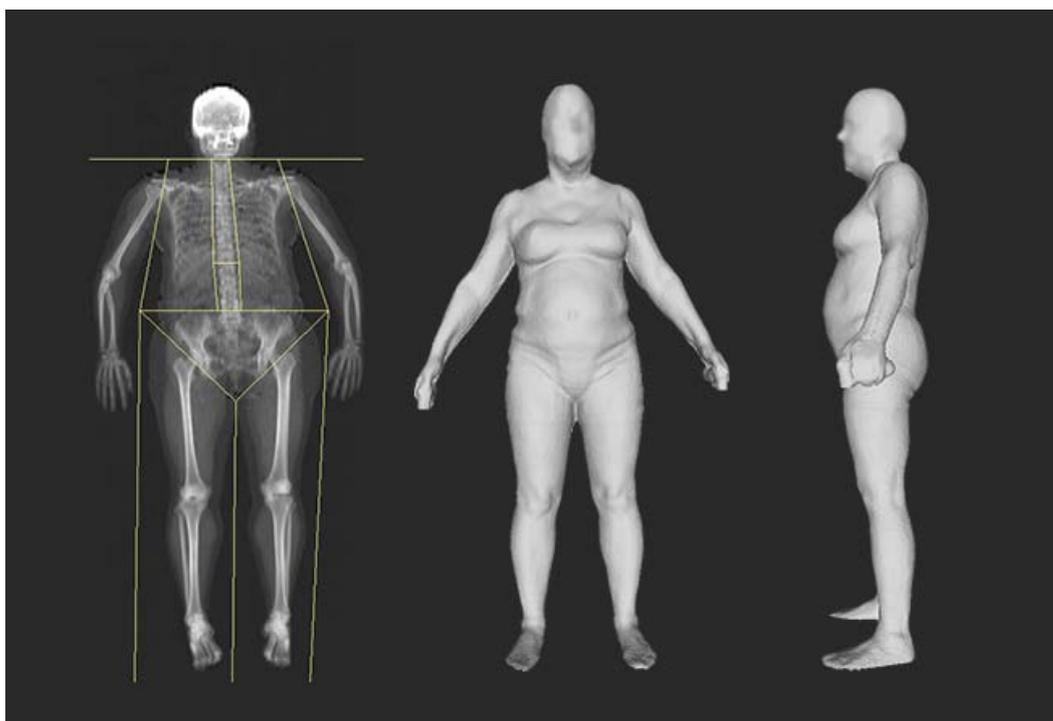
#### **E.1.4. Nuevas tecnologías: exploración bidimensional y tridimensional de toda la superficie corporal**

199. Durante mucho tiempo se ha recurrido a la forma del cuerpo como indicador de salud. El perímetro de la cintura y la proporción entre la cintura y la cadera se utilizan mucho a estos efectos. Además, una musculosidad o adiposidad elevadas resultan obvias a primera vista incluso para el observador común. Recientemente se han propuestos sistemas bidimensionales y tridimensionales de exploración de toda la superficie corporal como plataformas innovadoras para el estudio de la composición corporal. La gran accesibilidad, el costo reducido y la riqueza de datos sobre regiones anatómicas hacen de estas modalidades opciones atractivas para el estudio de la composición corporal por regiones anatómicas.

200. Las medidas bidimensionales de la forma del cuerpo se toman mediante una cámara digital estándar. Recientemente se ha demostrado la forma en que pueden obtenerse el índice de masa grasa y el

índice de masa magra a partir de simples imágenes de contorno de todo el cuerpo.<sup>19</sup> Esas imágenes de contorno pueden tomarse fácilmente con cámaras ordinarias como las de los teléfonos celulares, de ahí la gran idoneidad de las medidas bidimensionales de la composición corporal para distintas aplicaciones sobre el terreno. La exploración tridimensional de superficie y los correspondientes algoritmos de procesamiento de la exploración ofrecen una solución rápida, no invasiva y modificable para la medición de la forma del cuerpo. Las medidas obtenidas mediante exploraciones tridimensionales de superficie han demostrado ser muy precisas. Los algoritmos actuales de exploración pueden obtener automáticamente más de 400 medidas de longitud, superficie y volumen a partir de las exploraciones de cuerpo entero.

201. Recientemente se demostró que las medidas del volumen y la longitud de regiones anatómicas obtenidas mediante un escáner tridimensional de superficie con iluminación estructurada compuesto por ocho cámaras pueden utilizarse para estimar con exactitud las medidas de composición corporal obtenidas por DXA.<sup>20</sup> En la fig. E-3 se muestra un ejemplo comparativo de exploraciones por DXA y exploraciones tridimensionales de la superficie corporal. Se emplearon diversas medidas tridimensionales del volumen y la amplitud de regiones anatómicas para estimar el porcentaje de masa grasa y grasa corporal en todo el cuerpo ( $R^2 = 0,95$  y  $0,89$ , respectivamente), así como en las subregiones androide, ginoide, del tronco y las piernas. No obstante, se precisa una mayor validación con respecto a los métodos de referencia (DXA y dilución isotópica).



*Fig. E-3. Comparación de una exploración por DXA de cuerpo entero (izquierda) y una exploración óptica tridimensional de la superficie corporal, en proyección frontal (centro) y sagital (derecha). Las medidas de la forma corporal obtenidas mediante exploraciones tridimensionales de la superficie, como la anchura y amplitud del torso, así como el volumen de las regiones de las piernas y el tronco, pueden utilizarse para estimar con exactitud la composición corporal grasa y magra mediante DXA. (Cortesía: J. A. Shepherd, Universidad de California, San Francisco, Estados Unidos de América)*

<sup>19</sup> XIE, B., et al., Accurate body composition measures from whole-body silhouettes, *Med. Phys.* **42** (2015) 4668-4677.

<sup>20</sup> LEE, J.J., FREELAND-GRAVES, J.H., PEPPER, M.R., YU, W., XU, B., Efficacy of thigh volume ratios assessed via stereovision body imaging as a predictor of visceral adipose tissue measured by magnetic resonance imaging, *Am. J. Human Biol.* **27** (2015) 445-457.

202. Además de estimar con exactitud la composición corporal, las exploraciones tridimensionales de la superficie corporal pueden utilizarse para obtener varias otras medidas de importancia clínica. Entre ellas figuran las medidas directas como, por ejemplo, el perímetro de la cintura, e índices de fácil obtención como la proporción entre la cintura y la cadera y la proporción entre la cintura y la talla. Esas exploraciones proporcionan el método más accesible para medir directamente la superficie corporal. Asimismo, ese método es el instrumento más apropiado para medir el volumen de las regiones anatómicas, y puede utilizarse para calcular la proporción entre el volumen del tronco y el de las piernas, que se ha demostrado que es un importante factor de riesgo en la diabetes, la hipertensión, el síndrome metabólico y la mortalidad.<sup>21</sup>

## **F. Uso integrado de la radiación, la genética y métodos basados en simbiosis para la gestión de los mosquitos vectores de enfermedades**

### **F.1. Mosquitos y enfermedades transmitidas por mosquitos**

203. Las enfermedades transmitidas por los mosquitos suponen un riesgo mundial para la salud y el bienestar de las personas. Los mosquitos del género *Anopheles* (fig. F-1) transmiten el paludismo, que causa más de 600 000 muertes al año, mientras que los mosquitos Aedini *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* transmiten enfermedades como el dengue, que representa una amenaza para más de 2500 millones de personas en más de 100 países.<sup>22</sup> Muchas enfermedades transmitidas por los mosquitos se han propagado en los últimos años a zonas que anteriormente no se habían visto afectadas, en particular las transmitidas por la especie *Aedes albopictus*, muy invasora.



*Fig. F-1. Hembra de mosquito Anopheles arabiensis alimentándose de sangre.*

---

<sup>21</sup> WILSON, J.P., KANAYA, A.M., FAN, B., SHEPHERD, J.A., Ratio of trunk to leg volume as a new body shape metric for diabetes and mortality, PLoS One 8 7 (2013).

<sup>22</sup> ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Enfermedades transmitidas por vectores, Nota descriptiva N° 387, OMS, Ginebra (2014).

204. El paludismo se puede tratar mediante quimioterapia, por ejemplo, con medicamentos con artemisina, cuya creadora fue galardonada *ex aequo* con el Premio Nobel de Medicina de 2015.<sup>23</sup> Todavía no existe ninguna vacuna contra el chikungunya, el dengue ni el virus de Zika, de reciente aparición, y la eficacia de los fármacos antivíricos no es muy elevada. Por consiguiente, para reducir la carga de morbilidad es fundamental el control de los mosquitos vectores, que en la actualidad se procura principalmente mediante la aplicación de materiales tratados con insecticidas, la fumigación de interiores con insecticidas de acción residual y el uso de larvicidas.

205. Tal como ha reconocido la Organización Mundial de la Salud (OMS), se necesitan con urgencia más métodos para el control de los mosquitos, puesto que los avances logrados hasta la fecha en esta esfera corren peligro a causa de la inestabilidad que afecta a la disponibilidad de recursos, la creciente resistencia a los medios existentes y los cambios en el comportamiento de los mosquitos vectores, factores que aumentan la dificultad de actuar sobre ellos de forma selectiva. Un método adicional que ofrece perspectivas halagüeñas es la técnica de los insectos estériles (TIE), que se puede integrar con otras tácticas de control a fin de eliminar de forma efectiva las poblaciones de mosquitos.<sup>24</sup>

## **F.2. La técnica de los insectos estériles como mecanismo para controlar las poblaciones de mosquitos**

### **F.2.1. Desarrollo de la técnica de los insectos estériles para su uso contra los mosquitos**

206. En el último decenio se ha avanzado considerablemente en el desarrollo del “conjunto TIE” para cuatro especies de mosquitos transmisores de enfermedades (*Anopheles arabiensis*, *Anopheles gambiae*, *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*). Dicho conjunto contiene un equipo para la cría en masa, alimento artificial, métodos de esterilización mediante rayos gamma y rayos X, métodos para el control de la calidad y procedimientos normalizados de utilización a fin de llevar a cabo estudios de viabilidad sobre el uso de la TIE para gestionar las poblaciones de mosquitos. Actualmente existe un alimento universal para larvas, apto para mosquitos de los géneros *Anopheles* y *Aedes* y compuesto por ingredientes que se pueden conseguir fácilmente.<sup>25,26</sup> Gracias a este alimento líquido para larvas y a los procedimientos normalizados de utilización asociados se pueden criar larvas de *Anopheles* y *Aedes* de forma masiva en amplias bandejas dispuestas en un novedoso sistema basculante de portabandejas<sup>27, 28</sup> (fig. F-2). Las jaulas están diseñadas para facilitar la alimentación con sangre, el suministro de azúcar, la recogida de los huevos y la limpieza.<sup>29</sup> Además del suministro a discreción de una solución de azúcar al 10 %, se utiliza un sistema modificado Hemotek de alimentación por membranas para proporcionar dosis de

---

<sup>23</sup> CALLAWAY, E., CYRANOSKI, D., Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015, *Nature* **526** (2015) 174–175.

<sup>24</sup> LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156–162.

<sup>25</sup> DAMIENS, D., BENEDICT, M.Q., WILLE, M., GILLES, J.R., An inexpensive and effective larval diet for *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae): Eat like a horse, a bird, or a fish? *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 1001–1011.

<sup>26</sup> PUGGIOLI, A., et al., Efficiency of three diets for larval development in mass rearing *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 819–825.

<sup>27</sup> BALESTRINO, F., BENEDICT, M.Q., GILLES, J.R., A new larval tray and rack system for improved mosquito mass rearing, *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 595–605.

<sup>28</sup> BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., GILLES, J.R., BELLINI, R., Validation of a new larval rearing unit for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) *Mass Rearing*, *PLoS One* **19** (2014).

<sup>29</sup> BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., BELLINI, R., PETRIC D., GILLES, J.R., Mass production cage for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **51** (2014) 155–163.

sangre a los mosquitos hembra y verter agua en el suelo de la jaula para la oviposición.<sup>30</sup> Los huevos se recogen irrigando la parte inferior de la jaula, y a continuación se secan y se cuantifican de forma fiable para poder predecir la densidad larvaria de las bandejas de cría del siguiente ciclo de producción (fig. F-3). Los mosquitos macho pueden ser esterilizados en su estado avanzado de crisálida antes de su eclosión y suelta mediante irradiadores de rayos gamma o rayos X (fig. F-4). Se han establecido curvas de respuesta a las dosis para una de las especies de mosquitos objetivo más importantes, el *Anopheles arabiensis*,<sup>31,32</sup> con el fin de seleccionar la dosis óptima que esterilice satisfactoriamente a los machos y que asimismo les permita competir de forma eficiente con los machos silvestres.



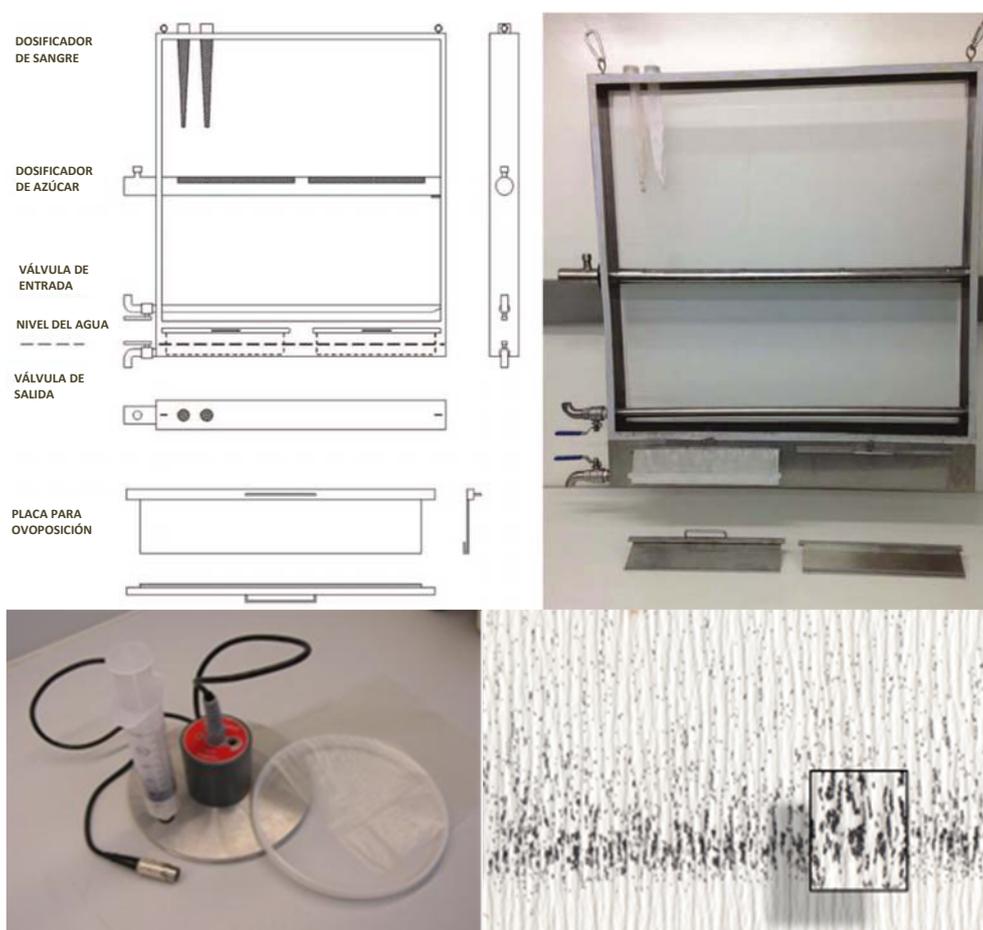
Fig. F-2. Alimento líquido para larvas, bandejas y portabandejas diseñados para la cría en masa de mosquitos en estado larvario. (Fotografía: OIEA)

---

<sup>30</sup> DAMIENS, D., et al., Different blood and sugar feeding regimes affect the productivity of *Anopheles arabiensis* colonies (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 336-343.

<sup>31</sup> NDO, C., et al., X-ray sterilization of the *An. arabiensis* genetic sexing strain 'ANO IPCL1' at pupal and adult stages, *Acta Trop.* **131** (2014) 124-128.

<sup>32</sup> YAMADA, H., VREYSEN, M.J., GILLES, J.R., MUNHENGA, G., DAMIENS, D.D., The effects of genetic manipulation, dieldrin treatment and irradiation on the mating competitiveness of male *Anopheles arabiensis* in field cages, *Malar. J.* **13** (2014) 318.



*Fig. F-3. Jaula para la cría en masa de mosquitos adultos del género Aedes, dispositivo para el suministro de sangre y huevos recogidos en papel de filtro. (Fotografía: OIEA)*



*Fig. F-4. Se utilizan irradiadores de rayos gamma (izquierda) o rayos X (derecha) para esterilizar a los mosquitos macho. (Fotografía: OIEA)*

207. Habida cuenta de que los mosquitos macho están expuestos al estrés de varios procesos, en particular la cría en masa, la esterilización, el transporte y la suelta, velar por la calidad adecuada de los insectos es motivo de gran preocupación. Además de registrarse parámetros para el control de la calidad durante la fase de producción, se llevan a cabo estudios de competitividad en condiciones semirreales con el fin de evaluar la calidad de los insectos. Las jaulas utilizadas en estos estudios simulan esas condiciones y constituyen un sustituto apropiado del entorno natural para llevar a cabo

este tipo de experimentos, así como para efectuar estudios de comportamiento, inclusión hecha de investigaciones sobre enjambrazones y estudios de compatibilidad con fines de apareamiento. Estas jaulas se han utilizado para examinar el efecto de varias proporciones de machos estériles y silvestres y la influencia de la edad de los machos estériles en su éxito al aparearse. Los datos preliminares obtenidos en relación con los mosquitos *Anopheles arabiensis*, del Sudán, *Anopheles gambiae*, de Burkina Faso, y *Aedes albopictus*, de China e Italia, han resultado fundamentales para mejorar los procesos de producción y, por ende, la competitividad de los machos estériles, que constituye un factor crucial para lograr un programa eficaz de gestión integrada zonal de plagas que incluya un componente de la TIE.

### F.2.2. Otros requisitos tecnológicos

208. En el caso de la TIE aplicada a los mosquitos, de la misma forma que en otros enfoques biológicos, es fundamental soltar únicamente a los mosquitos macho, toda vez que los mosquitos hembra son los vectores de la enfermedad y que los machos no pican a los humanos para alimentarse de sangre, por lo que no transmiten la enfermedad. La separación por sexo a fin de eliminar a las hembras de la cadena de producción es posible a pequeña escala merced al dimorfismo sexual de los mosquitos *Aedes*<sup>33,34</sup> o a la adición a las dosis de sangre de sustancias químicas como la ivermectina, que son tóxicas para las hembras de la especie *Anopheles arabiensis*<sup>35</sup>. La principal tarea que debe acometerse es el desarrollo de cepas eficaces y robustas de sexaje genético para eliminar de forma fácil y segura a las hembras de mosquito durante una cría en masa.<sup>36</sup> Durante varios años se ha podido utilizar una cepa de sexaje genético de *Anopheles arabiensis* basada en una mutación resistente a un insecticida (el tratamiento con dieldrina mataba a todas las hembras del mosquito, pero no a los machos resistentes), y recientemente se ha evaluado su posible uso en sueltas sobre el terreno. La cepa demostró escasa productividad e inestabilidad genética y se detectó que los machos adultos, que habían nacido de huevos tratados con dieldrina, presentaban pequeñas cantidades de residuos del insecticida. Por consiguiente, no se ha recomendado la utilización de esta cepa en aplicaciones funcionales a gran escala.<sup>37</sup> Actualmente se está trabajando en la búsqueda de nuevos marcadores morfológicos o condicionales letales para el mosquito *Anopheles arabiensis* y también para las especies *Aedes albopictus* y *Aedes aegypti*, a fin de desarrollar cepas eficaces de sexaje genético.

209. Además del conjunto TIE para mosquitos que se encuentra en fase de desarrollo, debe ampliarse la escala de las tecnologías para su aplicación en un ámbito funcional. El uso a gran escala de la TIE contra otras plagas de insectos continúa poniendo de relieve ámbitos en los que las nuevas tecnologías podrían aumentar la eficiencia y, por consiguiente, dar lugar a programas más eficaces de control de insectos. Las principales cuestiones por resolver son el manejo, el transporte a la zona objetivo y la suelta propiamente dicha de los machos estériles, tareas que deben llevarse a cabo sin que afecten de forma significativa a su supervivencia o a su desempeño en el apareamiento tras la suelta.

---

<sup>33</sup> FOCKS, D.A., An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **17** (1980) 567–568.

<sup>34</sup> CARVALHO, D.O., et al., Mass production of genetically modified *Aedes aegypti* for field releases in Brazil, *J. Vis. Exp.* **83** (2014) 3579.

<sup>35</sup> YAMADA, H., SOLIBAN, S.M., VREYSEN, M.J., CHADEE, D.D., GILLES, J.R., Eliminating female *Anopheles arabiensis* by spiking blood meals with toxicants as a sex separation method in the context of the sterile insect technique, *Parasit. Vectors* **6** (2013) 197.

<sup>36</sup> GILLES, J.R., et al., Towards mosquito sterile insect technique programmes: exploring genetic, molecular, mechanical and behavioural methods of sex separation in mosquitoes, *Acta Trop.* **132** Suppl (2014) S178–S187.

<sup>37</sup> YAMADA, H., et al., The *Anopheles arabiensis* genetic sexing strain ANO IPCL1 and its application potential for the sterile insect technique in integrated vector management programmes, *Acta Trop.* **142** (2015) 138–144.

## F.3. Métodos complementarios y su integración con la técnica de los insectos estériles para controlar las poblaciones de mosquitos

### F.3.1. Enfoques genéticos complementarios para el control de mosquitos

210. Además de la TIE, se han ideado varios otros enfoques para gestionar las poblaciones de mosquitos vectores. Estas plataformas tecnológicas se pueden clasificar de forma general en dos grupos. El primero comprende los enfoques “autolimitantes”, que se definen como los métodos cuyo efecto no puede perdurar en el entorno con el paso del tiempo. Por lo tanto, para lograr el efecto deseado de reducción de las poblaciones es necesario llevar a cabo sueltas de forma continua. Todos los métodos de eliminación de las poblaciones, como la TIE, el enfoque transgénico consistente en la suelta de insectos portadores de un gen dominante letal (RIDL) y la técnica de los insectos incompatibles basada en simbiosis, son ejemplos de enfoques autolimitantes. En el segundo grupo se incluyen los enfoques “autosostenibles”, que se definen como los métodos “invasivos” cuyo efecto puede perdurar en el entorno con el paso del tiempo gracias a una selección positiva. Pueden utilizarse para sustituir una población de mosquitos objetivo por otra que sea incapaz de transmitir la enfermedad. Se han propuesto distintos métodos para lograr este resultado, utilizando tecnologías transgénicas o bacterias simbióticas.

211. El enfoque transgénico RIDL se basa en la utilización de un sistema genético portador de un gen letal.<sup>38</sup> Las cepas homocigóticas portadoras del sistema RIDL pueden cultivarse en el laboratorio únicamente en presencia de un represor, que suele ser el antibiótico tetraciclina. La ausencia de este represor provoca la muerte de la descendencia. La cepa OX513A de *Aedes aegypti* portadora de esta secuencia genética ha sido estudiada en ensayos de eliminación de poblaciones en la isla de Gran Caimán, en el Brasil y en Panamá. Los machos y las hembras fruto de apareamientos entre los machos liberados de la cepa OX513A y hembras silvestres heredan una copia de la secuencia genética letal y mueren al inicio del estado de crisálida. Estos ensayos de eliminación, en los que se recurrió a sueltas secuenciales de machos transgénicos, se llevaron a cabo a pequeña escala y, según parece, los niveles de eliminación alcanzaron un promedio del 70-80 %.<sup>39,40</sup> Entre los problemas asociados a este enfoque cabe citar la falta de un sistema eficiente y robusto de sexaje, que es absolutamente indispensable para descartar la posibilidad de liberar hembras transmisoras del patógeno; la posibilidad de que se desarrolle resistencia en condiciones de cría en masa, y cuestiones relacionadas con los derechos de propiedad intelectual, la percepción negativa de la ciudadanía en algunas zonas y la aprobación reglamentaria.

### F.3.2. Enfoques basados en simbiosis

212. Los otros dos métodos, la técnica de los insectos incompatibles y el enfoque de la sustitución de poblaciones, tienen como elemento principal un género de bacterias simbióticas heredadas por vía materna denominado *Wolbachia*. Ha sido asociado a la inducción de varias anomalías reproductivas; la más común es una incompatibilidad citoplasmática que, en su forma más simple, se expresa como letalidad embrionaria en cruces entre machos infectados y hembras no infectadas.<sup>41</sup>

---

<sup>38</sup> ALPHEY, L., Genetic control of mosquitoes, *An. Rev. Entomol.* **59** (2014) 205–224.

<sup>39</sup> CARVALHO, D.O., et al., Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **9** (2015).

<sup>40</sup> HARRIS, A.F., et al., Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes, *Nat. Biotech.* **30** (2012) 828-830.

<sup>41</sup> WERREN, J.H., BALDO, L., CLARK, M.E., *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology, *Nat. Rev. Microbiol.* **6** (2008) 741–751.

213. Este simbiote se ha utilizado como instrumento para eliminar (técnica de los insectos incompatibles) o sustituir poblaciones de importantes especies de mosquitos vectores. El enfoque de la técnica de los insectos incompatibles para la eliminación de poblaciones se ha puesto a prueba en pequeños ensayos experimentales contra las especies *Culex pipiens*, *Culex pipiens quinquefasciatus*, *Aedes polynesiensis* y *Aedes albopictus*.<sup>42,43</sup> El principal problema que comporta dicho enfoque es que también requiere un sistema perfecto de sexaje, el cual actualmente no existe, a fin de descartar el riesgo de soltar hembras fértiles transmisoras de patógenos. Existen también algunas cepas de *Wolbachia* capaces de bloquear la transmisión de importantes patógenos humanos, por ejemplo, el plasmodio, el dengue y el chikungunya.<sup>44</sup> La suelta de una estirpe de *Aedes aegypti* transinfectada con la cepa wMel de *Wolbachia*, que arroja una fuerte incompatibilidad citoplasmática y también proporciona protección contra el dengue, propició la sustitución de poblaciones no infectadas cerca de Cairns (Queensland, Australia). No obstante, la infección por wMel influyó negativamente en la fecundidad y la producción de larvas, y la frecuencia de infección no suele llegar al 100 %, lo que permite suponer que los mosquitos *Aedes aegypti* infectados con wMel quizá no invadan rápidamente las poblaciones vecinas.<sup>45</sup> Entre otras preocupaciones con respecto a la sostenibilidad y la bioseguridad de la estrategia de sustitución de poblaciones cabe citar el posible desarrollo de resistencia, o que en algunas asociaciones simbióticas el bloqueo del patógeno pueda ser parcial o incluso no llegue a producirse. De hecho, la infección por *Wolbachia* puede potenciar la infección por otros patógenos, en particular los arbovirus.<sup>46</sup>

### F.3.3. Otros requisitos para la aplicación satisfactoria de los métodos de control genético

214. La aplicación a gran escala de todos los programas de eliminación de una población (la TIE, el enfoque transgénico o el enfoque basado en simbiotes) depende esencialmente de la disponibilidad de métodos eficientes y robustos de separación por sexo, dado que las sueltas de hembras plantearían un riesgo considerable de transmisión de patógenos. Ante la ausencia de un método eficiente para la separación por sexo, una estrategia segura y eficaz requeriría una combinación de la TIE y los enfoques basados en simbiotes para controlar las poblaciones de mosquitos vectores. La demostración en la práctica de este enfoque combinado se llevó a cabo contra la especie de mosquito *Aedes albopictus*.<sup>47,48</sup>

215. Independientemente del método o la combinación de métodos que sea más eficaz contra un mosquito vector específico en una región determinada, será necesario contar con el apoyo gubernamental y la participación del público para garantizar el éxito operacional. Este será probablemente un reto importante en el caso de los enfoques transgénicos, en los que la oposición del

---

<sup>42</sup> LAVEN, H., Eradication of *Culex pipiens fatigans* through cytoplasmic incompatibility, *Nature* **216** (1967) 383-384.

<sup>43</sup> LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156-162.

<sup>44</sup> MOREIRA, L.A., et al., A *Wolbachia* symbiont in *Aedes aegypti* limits infection with dengue, Chikungunya, and Plasmodium, *Cell* **139** (2009) 1268-1278.

<sup>45</sup> HOFFMAN, A.A., et al., Stability of the wMel *Wolbachia* infection following invasion into *Aedes aegypti* populations, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

<sup>46</sup> DODSON, B.L., et al., *Wolbachia* enhances West Nile virus (WNV) infection in the mosquito *Culex tarsalis*, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

<sup>47</sup> ZHANG, D., ZHENG, X., XI, Z., BOURTZIS, K., GILLES, J.R.L., Combining the sterile insect technique with the incompatible insect technique: I – Impact of *Wolbachia* infection on the fitness of triple- and double-infected strains of *Aedes albopictus*, *PLoS One* **10** (2015).

<sup>48</sup> ZHANG, D., LEES, R.S., XI, Z., GILLES, J.R.L., BOURTZIS, K., Combining the sterile insect technique with *Wolbachia*-based approaches: II – A safer approach to *Aedes albopictus* population suppression programmes, designed to minimize the consequences of inadvertent female release, *PLoS One* **10** (2015a).

público suele ser mayor y los trámites para lograr las autorizaciones son más estrictos, a diferencia de los enfoques basados en el uso de simbioses. La TIE, por el contrario, es aceptada de buen grado por las poblaciones locales y no requiere ninguna autorización. También hay cuestiones en relación con la propiedad intelectual asociadas al uso de las cepas transgénicas y los enfoques basados en simbioses que deben ser solventadas si una de estas técnicas se acaba aplicando a escala funcional. No obstante, debe abogarse por nuevos métodos, dado que es seguro que las fuerzas evolutivas fomentarán el desarrollo de una resistencia cada vez mayor contra los métodos convencionales de control de los mosquitos, y a la larga incluso contra los nuevos métodos de tipo transgénico y con *Wolbachia* para la protección contra patógenos. En cambio, no puede desarrollarse resistencia contra el enfoque de la TIE porque la irradiación induce mutaciones dominantes letales en el insecto objetivo de forma aleatoria. Quizá la única forma de gestionar las poblaciones de mosquitos y, potencialmente, controlar las numerosas enfermedades que transmiten, sea mediante un enfoque dinámico para la eliminación de poblaciones que integre la TIE y otras estrategias compatibles en un programa de gestión zonal de plagas de insectos.

## **G. Técnicas isotópicas para la adopción de medidas eficaces de conservación del suelo**

### **G.1. Uso combinado de técnicas de radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva y de isótopos estables de compuestos específicos para la adopción de medidas eficaces de conservación del suelo**

216. La degradación del suelo causada por prácticas de gestión agrícola inapropiadas acarrea la pérdida de suelo fértil y un bajo rendimiento de los cultivos, contribuyendo así a la inseguridad alimentaria. La pérdida de tierras cultivables, junto con la sedimentación y la contaminación de los arroyos y lagos, es también una importante amenaza ambiental, social y económica.

217. En septiembre de 2015, la iniciativa “Economía de la degradación de la tierra” publicó un informe, coincidiendo con el 70º período de sesiones de la Asamblea General de las Naciones Unidas, en el que declaraba que el costo de las pérdidas de los servicios de los ecosistemas a causa de la degradación de la tierra ascendía a 10,6 billones de dólares al año, y que la degradación de la tierra afectaba a 1400 millones de personas en todo el mundo.<sup>49</sup>

218. Para fomentar un uso y una gestión más sostenibles de los recursos agrícolas, se necesita obtener urgentemente datos cuantitativos fiables sobre la magnitud y el alcance espacial de la redistribución del suelo (erosión/sedimentación), y conocer mejor los factores clave que guían los procesos de erosión y sedimentación. Este mayor conocimiento contribuirá a determinar en qué esferas deberían aplicarse medidas apropiadas de conservación del suelo, que sirvan para controlar de manera eficaz las pérdidas causadas por la erosión, y reducir, con ello, las repercusiones económicas, sociales y ambientales.

---

<sup>49</sup> ECONOMICS OF LAND DEGRADATION INITIATIVE, The Value of Land: Prosperous Lands and Positive Rewards through Sustainable Land Management, Report, ELD Initiative, Bonn (2015).

### G.1.1. Radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva para la cuantificación de las tasas de erosión y sedimentación

219. El uso de radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva (FRN), como el cesio 137, originado a partir de los ensayos de armas termonucleares realizados entre los años cincuenta y sesenta del siglo pasado, así como de radioisótopos geogénicos naturales, como el plomo 210, y de radioisótopos cosmogénicos naturales, como el berilio 7, puede contribuir a evaluar la erosión del suelo y cuantificar la eficacia de las estrategias para su conservación.

220. Tras depositarse en la tierra por precipitación, los FRN se adhieren fuertemente a las partículas finas del suelo, de modo que resultan muy útiles como trazadores de suelo pues pueden ayudar a establecer las tasas de erosión y sedimentación y, por lo tanto, pueden utilizarse para evaluar la eficacia de las medidas de conservación del suelo destinadas a controlar la erosión y prevenir, con ello, la sedimentación excesiva asociada a ese fenómeno. Al tener orígenes y períodos de semidesintegración diferentes, el plomo 210 y el cesio 137 pueden aportar una base sólida para establecer la historia de la erosión de los suelos en amplios niveles de captación a largo y medio plazo, respectivamente. Con la inclusión del berilio 7, los FRN permiten además evaluar las pérdidas por erosión a corto plazo (cuadro G-1). Aunque muchos estudios se han limitado a utilizar un solo FRN, el uso de dos o incluso tres FRN puede aportar información más valiosa sobre la historia de la erosión, generando conjuntos de datos para diferentes períodos de tiempo.<sup>50</sup>

221. El hecho de que en todo el mundo haya aumentado el uso de FRN para cuantificar las tasas de erosión y sedimentación del suelo en una amplia gama de ambientes agrícolas, desde el terreno individual hasta la escala de cuenca hidrográfica, es una clara muestra de la validez y el potencial de estas técnicas isotópicas.<sup>51</sup>

Cuadro G-1. Ventajas y limitaciones comparativas del cesio 137 (<sup>137</sup>Cs), el plomo 210 (<sup>210</sup>Pb) y el berilio 7 (<sup>7</sup>Be) para cuantificar las tasas de redistribución del suelo tras los procesos de erosión y/o sedimentación.<sup>52</sup>

FRN	Origen	Energía (keV)	Tiempo		Muestreo	Escala	Detector	Medición		Datación de sedimentos
			t <sub>1/2</sub>	Alcance				Laboratorio	In-situ	
<sup>137</sup> Cs	Artificial creado por el hombre	662	30,2 años	50 años (medio plazo)	Simple	Parcela a gran cuenca hidrográfica	HPGe γ normal	Fácil	Fácil	Viable
<sup>210</sup> Pb	Geogénico natural	46	22,8 años	100 años (largo plazo)	Simple	Parcela a cuenca hidrográfica	HPGe γ de amplio rango de energías	Más difícil	Limitada y no fiable	Viable
<sup>7</sup> Be	Cosmogénico natural	477	53,3 días	≤ 6 meses (corto plazo)	Capas finas profundidad progresiva	Parcela local a terreno mayor	HPGe γ normal	Fácil	Mayor tiempo de contaje <i>cf.</i> <sup>137</sup> Cs	Viable

<sup>50</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, IAEA-TECDOC-1741, IAEA, Vienna (2014).

<sup>51</sup> MABIT, L., et al., Fallout <sup>210</sup>Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review, Earth-Science Reviews **138** (2014) 335–351.

<sup>52</sup> TAYLOR, A., BLAKE, WH., SMITH, H.G., MABIT, L., KEITH-ROACH, M.J., Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins, Earth-Science Reviews **126** (2013) 85–95.

### **G.1.2. Técnicas de isótopos estables de compuestos específicos para determinar las fuentes de los sedimentos**

222. Una técnica forense de isótopos estables desarrollada recientemente, que se basa en la firma de isótopos estables de compuestos específicos (CSSI) presente en los biomarcadores orgánicos inherentes al suelo, permite discriminar e identificar las fuentes de los sedimentos. Así, se puede usar la firma de los CSSI procedentes de distintos usos de la tierra para complementar la información proporcionada por los datos de los FRN.

223. Ello es posible porque la mayor parte de las comunidades de plantas producen una variedad de compuestos orgánicos que se filtran desde sus raíces adhiriéndose a las partículas del suelo y marcando un uso de la tierra particular mediante sus biomarcadores. Aunque todas las plantas producen biomarcadores similares, la firma del isótopo estable carbono 13 presente en esos biomarcadores suele ser distinta en cada especie de planta. La técnica CSSI se basa en la medición de la firma del isótopo estable carbono 13 presente en la cadena lineal (C14-C24) de los ácidos grasos de origen vegetal que forman parte del suelo. Estableciendo relaciones entre las huellas de CSSI del uso de la tierra y los FRN de los sedimentos presentes en las zonas de deposición, los investigadores obtienen un método exacto y potente para determinar el origen de los sedimentos e identificar las zonas propensas a la erosión del suelo.

224. Las técnicas de isótopos estables de compuestos específicos y de radionucleidos procedentes de la precipitación radiactiva son métodos complementarios para el estudio de la redistribución y el origen de los sedimentos terrestres. Los FRN proporcionan información sobre la magnitud de la redistribución del suelo en los sistemas agrícolas (o sobre la sedimentación en sus vías de salida), mientras que las huellas de CSSI aportan información sobre el origen de esos sedimentos.

225. Para combatir con éxito la degradación del suelo, y mitigar muchas de las repercusiones que se prevé que tenga el cambio climático, resulta fundamental entender mejor cómo podrían reducirse la erosión del suelo y los consiguientes problemas agroambientales relacionados con la sedimentación. El uso de estos métodos isotópicos integrados podría permitir que las comunidades agrícolas adoptaran medidas de mitigación específicas y eficaces, como el uso de la labranza mínima, la cobertura con recursos orgánicos, el cultivo de cobertura, el cultivo en terrazas, el cultivo de contorno y la construcción de pequeños muros y vallas, todo lo cual permitiría reducir al mínimo la pérdida de fertilidad del suelo, el deterioro de la productividad de los cultivos y de la calidad del agua y la sedimentación de los embalses (figs. G-1 y G-2).



*Fig. G-1. Agricultura en terrazas y de contorno utilizada para fomentar la conservación del suelo en una plantación de té de la provincia de Lam Dong (Viet Nam). (Fotografía: OIEA)*



*Fig. G-2. Transporte de sedimentos por erosión desde una superficie de captación hasta un embalse en Sri Lanka. (Fotografía: OIEA)*