



Examen de la Tecnología Nuclear de ■ 2021

Informe del Director General



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Átomos para la paz y el desarrollo

GC(65)/INF/2

Examen de la Tecnología Nuclear de 2021

Informe del Director General

GC(65)/INF/2

Impreso por el OIEA en Austria
Septiembre de 2021
IAEA/NTR/2021

Índice

| | |
|---|----|
| Prefacio..... | 5 |
| Resumen ejecutivo | 7 |
| A. Energía nucleoelectrica | 10 |
| A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrica | 10 |
| A.2. Centrales nucleares en funcionamiento | 11 |
| A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansión..... | 15 |
| A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica..... | 18 |
| A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua..... | 18 |
| A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares y microreactores | 19 |
| A.4.3. Sistemas de neutrones rápidos..... | 23 |
| A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica..... | 24 |
| A.4.5. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión nuclear para la producción de energía en el futuro | 27 |
| B. Ciclo del combustible nuclear | 30 |
| B.1. Parte inicial..... | 30 |
| B.2. Parte final..... | 33 |
| C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos | 34 |
| C.1. Clausura | 34 |
| C.2. Rehabilitación ambiental | 38 |
| C.3. Gestión de desechos radiactivos | 39 |
| D. Reactores de investigación y aceleradores de partículas | 43 |
| D.1. Reactores de investigación | 43 |
| D.2. Aceleradores de partículas e instrumentación | 47 |
| E. Alimentación y agricultura | 50 |
| E.1. Métodos de marcado isotópico y técnicas nucleares innovadoras para la medición de residuos en los alimentos — Respuestas a las necesidades de salud pública y del comercio | 50 |
| F. Salud humana | 52 |
| F.1. Avances en la microdosimetría y la nanodosimetría..... | 52 |
| G. Radioisótopos y tecnología de la radiación | 54 |
| G.1. Papel de los radiofármacos en la detección, el diagnóstico y la gestión de las enfermedades infecciosas | 54 |
| H. Medio ambiente | 57 |
| H.1. Técnicas nucleares y de base nuclear para promover el conocimiento del carbono azul mundial y hacer frente a las repercusiones del cambio climático | 57 |
| Anexo | 61 |

Prefacio

- En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio *Examen de la Tecnología Nuclear*.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2021* trata sobre los siguientes temas: la energía nucleoelectrónica, el ciclo del combustible nuclear, la clausura, la rehabilitación ambiental y la gestión de los desechos radiactivos, los reactores de investigación y los aceleradores de partículas, las técnicas nucleares en la alimentación y la agricultura, la salud humana, los radioisótopos y las tecnologías de la radiación, y el medio ambiente.
- La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores, en su reunión de marzo de 2021, en el documento GOV/2021/2. La presente versión definitiva se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones habidas durante la Junta de Gobernadores, así como las observaciones recibidas de los Estados Miembros.

Resumen ejecutivo

1. Las proyecciones de 2020 del Organismo fueron muy similares a las del año anterior. Según la proyección alta, la capacidad mundial de generación de electricidad nuclear aumentará un 82 % de aquí a 2050, situándose en 715 gigavatios (eléctricos) (GW(e)), correspondientes al 11 % de la generación mundial de electricidad, frente a un 10 % aproximadamente en 2019. La proyección baja augura una disminución del 7 %, hasta 363 GW(e), equivalentes al 6 % de la producción mundial de electricidad.
2. Al final de 2020, la capacidad nucleoelectrica total del mundo ascendía a 392,6 GW(e), generados por 442 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 32 países. El sector nuclear se adaptó a las directrices nacionales relativas a la pandemia de la enfermedad del coronavirus (COVID-19) adoptando medidas eficaces. Cuando comenzó la pandemia, a principios de 2020, el Organismo estableció la Red sobre la Experiencia Operacional de las Centrales Nucleares con la COVID-19, al objeto de ayudar a intercambiar información sobre las medidas adoptadas para mitigar la pandemia y su impacto en el funcionamiento de las centrales nucleares. Ninguno de los 32 países con centrales nucleares activas comunicó ninguna repercusión en la explotación segura y fiable de esas centrales a raíz de la pandemia.
3. En cuanto fuente de energía limpia, fiable, sostenible y moderna, la energía nucleoelectrica realiza una importante contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, al tiempo que da respuesta a las crecientes demandas de energía a escala mundial y promueve el desarrollo sostenible y la recuperación tras la pandemia de COVID-19. En 2020, la energía nucleoelectrica suministró 2553,2 teravatios-horas de electricidad, que representaron cerca de un tercio de la producción mundial de electricidad con bajas emisiones de carbono. Está ampliamente reconocido que la energía nucleoelectrica tendrá que desempeñar un importante papel en la respuesta a los desafíos que plantea la transición a una energía limpia.
4. Se conectaron a la red alrededor de 5,5 GW(e) de capacidad nuclear nueva, aportados por cinco nuevos reactores de agua a presión pertenecientes a Belarús, China, los Emiratos Árabes Unidos y la Federación de Rusia. La puesta en marcha de la Unidad 1 de la central nuclear de Belarús y de la Barakah 1 de los Emiratos Árabes Unidos representó el inicio de la generación de electricidad nuclear en estos dos países.
5. Las actividades mundiales de desarrollo de la tecnología de los reactores pequeños, medianos o modulares (SMR) para el despliegue a corto plazo arrojaron progresos tangibles. En la Federación de Rusia comenzaron a funcionar los primeros SMR avanzados y la única central nuclear flotante del mundo, Akademik Lomonosov. A nivel mundial, prosiguió el desarrollo de más de 70 diseños de SMR de las principales líneas tecnológicas para diferentes aplicaciones.
6. Aumentó el número de reactores nucleares de potencia con programas de explotación a largo plazo y gestión del envejecimiento en curso en todo el mundo, especialmente en América del Norte y Europa. En los Estados Unidos de América, la renovación de las licencias de explotación de las Unidades 2 y 3 de la central nuclear de Peach Bottom prolongó la explotación tecnológica y físicamente segura de estos reactores de 60 a 80 años.
7. Un total de 27 Estados Miembros trabajaron en alguna etapa de la preparación de su infraestructura nacional para un nuevo programa nucleoelectrico; se prevé que de aquí a 2035 habrán introducido la energía nucleoelectrica entre 10 y 12 países nuevos, añadiendo un total estimado de 26 GW(e) a la capacidad de generación mundial.

8. La colectividad de expertos en la fusión nuclear celebró el comienzo del ensamblaje y la integración del ITER después de más de diez años de complejas fases de construcción. Cuando esté en funcionamiento, el ITER proporcionará gran parte de la base científica y tecnológica necesaria para el desarrollo y diseño de los futuros reactores de fusión capaces de producir energía.

9. Debido a la pandemia mundial de COVID-19, varios importantes productores de uranio suspendieron las operaciones o redujeron considerablemente la producción. Globalmente, la oferta primaria de uranio fue menor en 2020, aumentando la necesidad de cubrir la demanda de uranio como combustible nuclear con suministros secundarios.

10. Durante la pandemia de COVID-19, los reactores de investigación que producen radioisótopos de uso médico para el suministro mundial fueron declarados proveedores de servicios esenciales con el objetivo de reducir al mínimo el efecto de las restricciones relacionadas con la pandemia.

11. Aunque el interés por los SMR es considerable y va en aumento, se prevé que en los próximos tres decenios la mayor parte de la nueva capacidad añadida procederá de los grandes reactores avanzados refrigerados por agua. El cumplimiento de la proyección alta del Organismo exigiría una tasa de conexión a la red de por lo menos 16 GW(e) anuales hasta 2050. Para ello, sin embargo, sería necesario facilitar la ejecución de nuevos proyectos de construcción abordando una serie de retos, como la reducción de los costos y el establecimiento de una mayor normalización que mejore la competitividad, además del acceso a financiación en condiciones de paridad con las otras fuentes de energía de bajas emisiones de carbono.

12. El uso de la energía nuclear para fines distintos de la producción de electricidad está cobrando impulso en el sector de la energía nuclear, debido al aumento de las energías renovables variables conectadas a la red como proporción del total. Un total de 64 reactores nucleares de potencia operativos generaron 3396,4 gigavatios-horas de equivalente eléctrico del calor para aplicaciones no eléctricas: 56 reactores apoyaron la calefacción urbana y aplicaciones de calor industrial y 8, la desalación. Junto con cumplir la función de descarbonizar los sectores de consumo final, como el transporte, la industria o el sector residencial, la cogeneración nuclear está siendo vista cada vez más como una buena justificación económica para no retirar prematuramente del servicio algunas centrales nucleares no rentables. En cuanto a la producción nuclear de hidrógeno con reactores de baja temperatura refrigerados por agua, se prevé que el persistente interés llevará esta tecnología hasta la etapa comercial.

13. Se observaron adelantos importantes en relación con las instalaciones de disposición final geológica profunda necesarias para los desechos de actividad alta y el combustible gastado declarado como desecho. La Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear de Finlandia anunció que el país tiene la intención de iniciar la disposición final de su combustible nuclear gastado a mediados de la década de 2020. En Suecia, el concejo municipal de Östhammar votó a favor del plan de construir un repositorio para el combustible nuclear gastado en Forsmark.

14. Mientras que en los decenios pasados el desmantelamiento diferido fue la estrategia de clausura adoptada por la mayoría de los propietarios de instalaciones, ahora está cobrando apoyo el enfoque del desmantelamiento inmediato. Los plazos para el inicio del desmantelamiento final de las centrales retiradas del servicio se han acortado cada vez más, ante el deseo de reducir las incertidumbres con respecto a los costos de la clausura.

15. El interés mundial por los reactores de investigación siguió creciendo. Muchos países aprovecharon las oportunidades de acceso a los reactores de ese tipo ya existentes, por ejemplo a través de los cursos regionales con reactores de investigación impartidos por el Organismo para el fomento de la capacidad y del plan de los Centros Internacionales basados en Reactores de Investigación (ICERR) designados por el OIEA. En 2020 se sumó a esos centros el Instituto de Investigaciones Nucleares de Pitesti, en Rumania, y la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia fue designada como ICERR por otro período de cinco años.

16. En la producción de alimentos se utilizan productos químicos tales como medicamentos veterinarios y plaguicidas para prevenir y tratar las plagas y enfermedades de animales y plantas. Los residuos de estos productos químicos en los alimentos plantean preocupaciones de salud pública y problemas comerciales y, por lo tanto, se regulan prescribiendo las concentraciones máximas permitidas en la superficie o dentro de los alimentos. Los compuestos radiomarcados desempeñan un papel crucial en este ámbito, ya que permiten rastrear y estudiar todos los residuos químicos en los distintos tejidos. Estos estudios son fundamentales para el establecimiento de normas aceptables. Con la creciente producción de nuevos medicamentos y productos químicos, la demanda de que se reglamenten utilizando técnicas analíticas innovadoras y eficaces en relación con el costo ha venido aumentando.

17. La microdosimetría es el subcampo de la física de las radiaciones que estudia sistemáticamente la distribución espacial de la energía absorbida en las estructuras microscópicas de la materia irradiada. Nacida hace más de 60 años, la microdosimetría sigue despertando interés científico en la medicina radiológica, la protección radiológica, la radiobiología y otros ámbitos como la investigación espacial. En el campo de la medicina radiológica, la microdosimetría reviste particular interés en la terapia con haces iónicos, una técnica avanzada que utiliza haces de protones y de iones de carbono para curar diversos tumores, con un daño mínimo al tejido sano.

18. Las enfermedades infecciosas son una amenaza para las poblaciones humanas. Las disciplinas científicas están centrando sus esfuerzos en entender mejor esas enfermedades con ayuda de tecnologías avanzadas que utilizan radiofármacos. La tecnología novedosa de los radiofármacos preparados con anticuerpos monoclonales contra microorganismos específicos se encuentra en una fase en que está siendo posible la visualización no invasiva de los procesos celulares y bioquímicos, con la consiguiente mejora de los métodos para el diagnóstico, y posiblemente el tratamiento, de las enfermedades infecciosas.

19. El rápido aumento de los gases de efecto invernadero de la atmósfera, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, desde finales del siglo XIX ha contribuido al calentamiento global. Los océanos y los ecosistemas costeros vegetados tienen un notable potencial de secuestro de carbono orgánico, al extraer dióxido de carbono de la atmósfera y almacenarlo, reduciendo así el ritmo del calentamiento mundial. El carbono orgánico capturado y almacenado por el océano se conoce como carbono azul. Las técnicas nucleares y de base nuclear son fundamentales para evaluar el papel del carbonato y las macroalgas en el ciclo del carbono azul, determinar la procedencia del carbono, entender los factores que influyen en el secuestro en los ecosistemas de carbono azul y los correspondientes balances, y determinar las medidas de ordenación adecuadas para promover las estrategias basadas en ese carbono orgánico.

A. Energía nucleoelectrica

A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrica

Situación

1. Las proyecciones de 2020 del Organismo¹ fueron muy similares a las del año anterior. Según la estimación baja, la capacidad mundial de generación de electricidad nuclear disminuirá un 7 % de aquí a 2050, situándose en 363 GW(e)², equivalentes al 6 % de la generación mundial de electricidad, frente a un 10 % aproximadamente en 2019. La estimación alta proyecta un aumento del 82 %, hasta 715 GW(e), correspondientes al 11 % de la producción mundial de electricidad.

Proyección baja

7% ↓

de disminución con respecto a la capacidad instalada actual de **392** GW(e), hasta unos **363** GW(e) correspondientes a un **6%** de la generación total de electricidad

Proyección alta

82% ↑

de disminución con respecto a la capacidad instalada actual de **392** GW(e), hasta unos **715** GW(e) correspondientes a un **11%** de la generación total de electricidad

2. Para lograr el aumento previsto en la proyección alta, se requerirá un amplio recurso a la explotación a largo plazo del parque de reactores nucleares de potencia ya existente, típicamente más allá de los 40 años de funcionamiento, y un esfuerzo importante de construcción de nueva capacidad, del orden de 500 GW(e) a lo largo de tres decenios. Para ello habrá que conectar más de 16 GW(e) de nueva capacidad por año hasta 2050, una tasa de conexión casi tres veces superior al promedio del período 2010-2019. Si bien ambiciosa, esta meta correspondería a solo la mitad de la tasa récord, de más de 30 GW(e) conectados anualmente, registrada a mediados de los años ochenta.

Tendencias

3. El interés por los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR) es considerable y va en aumento, especialmente en las zonas remotas y en los países con redes más pequeñas. Aun así, se prevé que en los próximos tres decenios la mayor parte de la nueva capacidad añadida será aportada por los grandes reactores avanzados refrigerados por agua, a fin de elevar rápidamente la capacidad de producir energía con bajas emisiones de carbono en la lucha contra el cambio climático. A este respecto, el sector nuclear se enfrenta a una serie de retos, como la reducción de los costos, el establecimiento de una mayor normalización que mejore la competitividad, y el acceso a financiación en condiciones de paridad con las otras fuentes de energía de bajas emisiones de carbono.

4. Se requerirá un fuerte apoyo de las políticas, que deberán reconocer la contribución de la energía nucleoelectrica al establecimiento de sistemas de suministro de electricidad resilientes, fiables y de bajas emisiones de carbono³. El fomento de oportunidades para que la energía nuclear contribuya a la

¹ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2020).

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

³ La energía nucleoelectrica evita la emisión de alrededor de dos gigatoneladas de dióxido de carbono cada año.

descarbonización de otros sectores energéticos, por ejemplo mediante la producción de hidrógeno limpio, podría también aumentar el atractivo de la energía nucleoelectrica para los inversores.

A.2. Centrales nucleares en funcionamiento

Situación

5. Al final de 2020, la capacidad total de producción de energía nucleoelectrica del mundo ascendía a 392,6 GW(e)⁴, generados por 442 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 32 países (cuadro A-1 del anexo). Los países demostraron su capacidad de adaptación a la pandemia de la enfermedad del coronavirus (COVID-19) adoptando medidas eficaces, que dieron fe de una sólida cultura institucional. Cuando comenzó la pandemia, a principios de 2020, el Organismo estableció la Red sobre la Experiencia Operacional de las Centrales Nucleares con la COVID-19 (Red OPEX COVID-19), al objeto de intercambiar información sobre las medidas adoptadas para mitigar la pandemia y sus repercusiones en el funcionamiento de las centrales nucleares. Ninguno de los 32 países con programas nucleoelectricos en curso comunicó ningún suceso operacional causado por la pandemia que tuviera algún impacto en la explotación segura y fiable de sus centrales nucleares.

La energía nucleoelectrica ayuda a los Estados Miembros a reducir las emisiones de GEI

Generada en **32 países**, la energía nucleoelectrica produce

~1/3 de la electricidad mundial con bajas emisiones de carbono.

La energía nucleoelectrica reduce las emisiones de dióxido de carbono en **~2 gigatoneladas al año**.

Esto es el equivalente a retirar de la circulación más de **400 millones de automóviles** cada año.

La energía nucleoelectrica ha evitado el equivalente a **55 gigatoneladas de emisiones de dióxido de carbono** durante los últimos 50 años o más.

6. En cuanto fuente de energía limpia, fiable, sostenible y moderna, la energía nucleoelectrica realiza una importante contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo, al tiempo que da respuesta a las crecientes demandas de energía a escala mundial y promueve el desarrollo sostenible y la recuperación después de la pandemia de COVID-19. En 2020, la energía nucleoelectrica suministró 2553,2 teravatios-horas de electricidad, que representaron cerca de

⁴ Datos sobre los reactores nucleares de potencia comunicados al Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del OIEA hasta el 1 de junio de 2021.

un tercio de la producción mundial de electricidad sin emisiones de GEI, que representaron alrededor del 10 % de la producción mundial total de electricidad y cerca de un tercio de la producción mundial de electricidad con bajas emisiones de carbono.

7. Se conectaron a la red unos 5,5 GW(e) de capacidad nuclear nueva, procedentes de cinco nuevos reactores de agua a presión (PWR): Belarús 1 (1110 MW(e)) de Belarús, Tianwan 5 (1000 MW(e)) y Fuqing 5 (1000 MW(e)) de China, Leningrad 2-2 (1066 MW(e)) de la Federación de Rusia y Barakah 1 (1345 MW(e)) de los Emiratos Árabes Unidos. La puesta en marcha de la Unidad 1 de la central nuclear de Belarús y de la Barakah 1 de los Emiratos Árabes Unidos representó el inicio de la generación de electricidad nuclear en estos dos países.

Conexiones a la red en 2020

Barakah 1

 **1345** MW(e)

Belarusian 1

 **1110** MW(e)

Leningrad 2 2

 **1066** MW(e)

Fuqing 5

 **1000** MW(e)

Tianwan 5

 **1000** MW(e)

Belarús 1



Tipo

PWR

Modelo

WWER V-491

Capacidad neta

1110 MW(e)

Inicio de la construcción

8 nov 2013

Primera criticidad

11 oct 2020

Primera conexión a la red

3 nov 2020

Misiones INIR 1+2

2012

Misión INIR 3

2020

Barakah 1



| | |
|--------------------|---------------------------|
| Tipo | Modelo |
| PWR | APR-1400 |
| Capacidad neta | Inicio de la construcción |
| 1345 MW(e) | 19 jul 2012 |
| Primera criticidad | Primera conexión a la red |
| 31 jul 2020 | 19 ago 2020 |
| Misión INIR 2 | Misión INIR 3 |
| 2011 | 2018 |

8. En 2020 comenzó la explotación comercial de los primeros SMR avanzados y de la única central nuclear flotante del mundo, Akademik Lomonosov. Esta central se encuentra frente a la costa ártica de la Federación de Rusia y comprende dos unidades de SMR KLT-40S de 35 megavatios (eléctricos) (MW(e)).

9. Aproximadamente un 89,5 % de la capacidad de generación de energía nucleoelectrónica fue aportada por reactores refrigerados y moderados por agua ligera; un 6 % correspondió a reactores refrigerados y moderados por agua pesada; un 2 %, a reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito; y el restante 2 %, a reactores refrigerados por gas. El 0,5 % restante correspondió a tres reactores rápidos refrigerados por metal líquido.

10. Aumentó el número de reactores nucleares de potencia con programas de explotación a largo plazo y gestión del envejecimiento en curso en todo el mundo, especialmente en América del Norte y Europa. En los Estados Unidos de América, la renovación de las licencias de explotación de las Unidades 2 y 3 de la central nuclear de Peach Bottom prolongó la explotación tecnológica y físicamente segura de 60 a 80 años.

11. Las obras de renovación y los grandes proyectos de mejoras continuaron a pesar de los retos planteados por la pandemia de COVID-19. Por ejemplo, durante este período se terminaron la renovación de la unidad Darlington 2, en el Canadá, y la modernización de los sistemas de control y emergencia en las unidades Doel 1 y 2 de Bélgica. En los Estados Unidos de América, la unidad Grand Gulf 1 fue reconectada a la red tras una parada programada de mantenimiento y recarga de combustible, que incluyó mejoras del equipo y la modernización del sistema de control de las turbinas de la central.

12. Durante el año se retiraron de la producción 5,2 GW(e) de capacidad nuclear, con la puesta en régimen de parada definitiva de 6 reactores nucleares de potencia: Fessenheim 1 (un reactor de agua a presión (PWR) de 880 MW(e)) y Fessenheim 2 (un PWR de 880 MW(e)) en Francia, Leningrad 2 (un reactor de grafito y agua ligera de 925 MW(e)) en la Federación de Rusia, y Duane Arnold (un reactor de agua en ebullición de 601 MW(e)) e Indian Point 2 (un PWR de 998 MW(e)) en los Estados Unidos de América. Ringals-1 (un reactor de agua en ebullición (BWR) de 881 MW(e)), en Suecia, fue puesto en régimen de parada el último día de 2020, después de más de 46 años en funcionamiento.

Experiencia acumulada en la explotación de reactores nucleares a nivel mundial

18 772 años-reactor
con **479,9** GW(e) de capacidad total

 **634**
reactores

 **35**
países
que han explotado alguna vez
una central nuclear

Tendencias

13. Globalmente, la capacidad nucleoelectrica experimentó un crecimiento gradual en el último decenio, con la adición de alrededor de 23,7 GW(e) de capacidad nueva aportados por reactores nuevos o por mejoras de reactores ya existentes. La generación de energía nucleoelectrica aumentó constantemente, creciendo más de un 6 % desde 2011.

14. La explotación a largo plazo es esencial no solo para la transición a sistemas de generación de electricidad con bajas emisiones de carbono y el cumplimiento de los objetivos de emisión neta cero de carbono, sino también para disponer de un margen de tiempo que permita desarrollar la nueva capacidad de generación con bajas emisiones, incluidas las nuevas centrales nucleares. Además, las centrales nucleares existentes son la fuente más barata de electricidad tecnológica y físicamente segura y de bajas emisiones de carbono. Sin embargo, algunos reactores fueron puestos en régimen de parada en el último decenio, y es probable que otros tengan que cerrar en el futuro próximo por motivos económicos, aun cuando se les haya concedido la licencia para una prórroga de la explotación. Esto ha sido particularmente marcado en los Estados Unidos de América, donde en el último decenio tuvieron que ser puestos en régimen de parada por motivos económicos unos diez reactores, al no poder competir con el gas de lutita de bajo costo o las fuentes de energía renovable subvencionadas. En algunas partes del país se han introducido mecanismos de mercado tales como los créditos de emisión cero para valorizar la contribución de la energía nucleoelectrica a la descarbonización de la matriz energética y evitar el cierre de las centrales. En otras partes del mundo, la adopción de decisiones de política apropiadas puede ser fundamental para posibilitar la explotación a largo plazo de los reactores existentes.

15. Además, persisten algunas incertidumbres con respecto a la cadena de suministro del sector de la energía nucleoelectrica. El cierre de industrias consideradas no esenciales a corto plazo tendrá un impacto aún desconocido en la continuidad del suministro a mediano y largo plazo para los reactores nucleares de todo el mundo. Las cadenas de suministro han afrontado dificultades que podrían repercutir en las operaciones en curso, los proyectos y las paradas programadas. Sin embargo, en los países en fase de incorporación están apareciendo nuevas cadenas de suministro, que podrían significar la entrada de nuevos actores en el sector.

A.3. Programas nucleoelectrónicos nuevos o en expansión

Situación

16. La capacidad nucleoelectrónica instalada en fase de construcción no ha variado mucho en los últimos años, aunque el crecimiento de las construcciones nuevas fue más lento en 2020. En la región de Asia prosiguió la expansión constante de esa capacidad, con 64 reactores, de una capacidad operacional total de 58,5 GW(e), conectados a la red desde 2005.

17. De los 32 países que utilizan energía nucleoelectrónica, 19 tenían proyectos establecidos para ampliar su capacidad nuclear; entre ellos se cuentan Belarús y los Emiratos Árabes Unidos, que conectaron sus primeros reactores nucleares de potencia a la red en 2020. Esos proyectos sumaban una capacidad total de 54,4 GW(e), procedente de 52 reactores nuevos.

Proyectos de reactores nuevos en programas nucleoelectrónicos ya existentes

54,4 GW(e)  **52**
aportados por **reactores nuevos**

incluidas las nuevas construcciones de:

 **Zhangzhou 2** **Taipingling 2**
1126 MW(e) **1116** MW(e)

Sanacoun-1
1117 MW(e)

18. Las restricciones de los viajes y los cierres de fronteras causados por la COVID-19 redujeron la capacidad de los contratistas de apoyar nuevos proyectos de construcción. El resultado fue un uso más amplio de la verificación a distancia e híbrida. Algunos reguladores nacionales aplicaron enfoques innovadores durante la pandemia, o ajustaron el alcance de las inspecciones reglamentarias teniendo en cuenta su importancia para la seguridad.

19. De los 50 Estados Miembros que han manifestado interés en introducir la energía nucleoelectrónica, 23 están en la etapa previa a la decisión, realizando actividades de planificación energética. Los otros 27 ya están trabajando a ese respecto:

- 17 están en plena fase de adopción de decisiones, estudiando la energía nucleoelectrónica y, en algunos casos, preparando ya activamente la infraestructura aun sin haber tomado una decisión (Argelia, Bolivia, Chile, El Salvador, Etiopía, Filipinas, Indonesia, Kazajistán, Marruecos, Níger, Senegal, Sri Lanka, Sudán, Tailandia, Túnez, Uganda, Zambia).
- 10 están en la fase posterior a la decisión, es decir, han tomado la decisión y están construyendo la infraestructura, o han firmado un contrato, y están preparándose para comenzar la construcción o ya la han iniciado (Arabia Saudita, Bangladesh, Egipto, Ghana, Kenya, Jordania, Nigeria, Polonia, Turquía, Uzbekistán).

27 países en fase de incorporación

17

en la fase de adopción de decisiones

Países que están estudiando la energía nucleoelectrica aun sin haber tomado una decisión definitiva



10

en la fase posterior a la decisión

Países que han tomado la decisión y están construyendo la infraestructura, o han firmado un contrato, y están preparándose para comenzar la construcción o ya la han iniciado



20. Sobre la base de los planes nacionales actuales de los 27 Estados Miembros arriba mencionados, se prevé que para 2035 habrán implantado la energía nucleoelectrica otros 10 o 12 países, agrandando así el grupo de los 32 Estados Miembros que actualmente explotan centrales nucleares en alrededor de un 30 %. Se estima que la capacidad de generación adicional que aportarán estos nuevos países de aquí a 2035 será de unos 26 GW(e).

Sobre la base de los planes nacionales actuales de **27** Estados Miembros
entre 10 y 12 nuevos países comenzarán a producir energía nucleoelectrónica de aquí a **2035**
agrandando el grupo de los **32** Estados Miembros que actualmente explotan centrales nucleares en alrededor de un **30 %**

La capacidad de generación adicional que aportarán estos nuevos países se estima en unos **26 GW(e)**

21. En 2020, debido a las limitaciones impuestas por la pandemia de COVID-19, solo un país, Belarús, acogió una misión de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) (de Fase 3). Las otras misiones programadas fueron aplazadas a 2021, a petición de los respectivos Gobiernos: Kenya (Fase 1, de seguimiento), Sri Lanka (Fase 1), Uganda (Fase 1) y Uzbekistán (Fase 2). Además, 15 Estados Miembros tenían planes de trabajo integrados activos. Algunos de ellos lograron someter sus planes al examen anual antes de que se restringieran los viajes a raíz de la COVID-19, mientras que los demás planes fueron examinados en reuniones virtuales.

22. En Bangladesh, se suministraron equipos importantes a la central de Rooppur, y la vasija de presión del reactor fue forjada y puesta a prueba a comienzos de 2020. La puesta en servicio está programada para 2023. En la central nuclear de Akkuyu, en Turquía, prosiguió en 2020 la construcción de dos unidades. La vasija de presión del reactor de la Unidad 1 fue expedida desde la fábrica, y el emplazamiento recibió cuatro generadores de vapor. Según los planes, la puesta en servicio de la primera unidad tendrá lugar en 2023. En Egipto, se otorgó la licencia para el emplazamiento de la central nuclear de cuatro unidades de El Dabaa, y continuó la preparación del lugar para la construcción. El inicio de la construcción de la primera unidad está previsto para el segundo semestre de 2021, si se obtiene la aprobación reglamentaria.

23. En la Arabia Saudita, el proceso de licitación de las dos primeras unidades grandes de la central nuclear, de 1000 a 1600 MW(e), debería comenzar antes del final de 2021, y en 2024 se espera seleccionar al proveedor de la tecnología de la central nuclear; la puesta en servicio de la primera unidad está programada para 2036.

24. Polonia decidió construir centrales nucleares con una capacidad instalada total de entre 6,0 y 9,0 GW(e) utilizando la tecnología de los reactores grandes de agua a presión. Según los planes, la primera central nuclear se comenzará a construir en 2026 y entrará en funcionamiento en 2033.

25. Jordania está siguiendo dos vías paralelas en el desarrollo de un programa nucleoelectrico que comprende varios SMR y una central nuclear grande (de 1000 MW(e)), basada en el enfoque de la construcción, explotación y transferencia, o de la construcción, propiedad, explotación y transferencia), dando prioridad a los SMR. El vertido del primer hormigonado está programado para 2026, y el inicio de la explotación comercial, para 2031.

26. Uzbekistán tiene previsto comenzar a construir centrales nucleares con una capacidad instalada total de 2,400 GW(e) antes del final de 2022. En Ghana hay planes para iniciar la construcción de la primera central nuclear en 2023 y ponerla en servicio en 2029. Kenya estableció una nueva organización,

la Agencia de Energía Nucleoeléctrica y Nuclear, y emitió un informe de evaluación ambiental estratégico para la consulta pública, con el despliegue de la central nuclear previsto para 2035. En julio de 2020, Filipinas publicó una orden ejecutiva por la que creó el Comité Interinstitucional del Programa Nucleoeléctrico, encargado de estudiar la viabilidad de la implantación de la energía nucleoeléctrica. Sri Lanka solicitó oficialmente una misión INIR.

Tendencias

27. Los proyectos de construcción de nuevas instalaciones, tanto en los países que ya utilizan energía nucleoeléctrica como en los que están en fase de incorporación, tropiezan con dos retos en el frente económico: la competitividad de la energía nucleoeléctrica, en comparación con las tecnologías energéticas alternativas, y el acceso a financiación para las inversiones que requieren esos proyectos.

28. Con el número relativamente bajo de nuevos proyectos de construcción del último decenio, el sector nuclear no ha experimentado aún las importantes reducciones de costos que han beneficiado a las tecnologías de energía renovable, cuyo despliegue se ha visto facilitado por un considerable apoyo a nivel de las políticas y financiero. Esta situación ha afectado a la competitividad de la energía nucleoeléctrica, desde el punto de vista de los costos normalizados. Sin embargo, cada vez está más claro que los costos tecnológicos deberían comprender también el costo de la integración en los sistemas de electricidad futuros, incluidos los de la conexión a la red y los del almacenamiento o las reservas de energía. A nivel de los sistemas, la energía nucleoeléctrica puede ser competitiva con las energías renovables y las soluciones de almacenamiento. Además, el sector nuclear ve un potencial de reducción de los costos de construcción mediante la simplificación de los diseños, una mayor normalización, una mejor supervisión de la cadena de suministros y el pleno aprovechamiento de las lecciones aprendidas de los primeros proyectos.

29. El segundo reto se relaciona con el acceso a la financiación. Los proyectos de construcción de nuevas instalaciones nucleares son inevitablemente proyectos de gran densidad de capital, y pocas empresas de servicios públicos son capaces de financiar proyectos con sus propios haberes. El apoyo de las políticas puede ayudar a conseguir financiación de muchas maneras, reduciendo los riesgos para los promotores de los proyectos, ya sea durante la construcción o durante la explotación, a fin de garantizar un rendimiento en condiciones de mercado inciertas, por ejemplo mediante contratos de compra de energía eléctrica (CCEE). (En estos contratos, el comprador se compromete a adquirir una cantidad acordada de electricidad a un precio fijo que cubra el costo total del proyecto, más un margen, so pena de sanción monetaria.)

30. Varios países en fase de incorporación han incluido diseños de SMR en sus evaluaciones tecnológicas; entre ellos figuran la Arabia Saudita, Estonia, Ghana, Jordania, Kenya y el Sudán. Los SMR pueden tener ventajas con respecto a los reactores grandes, como los menores costos de inversión iniciales, su aplicabilidad a redes más pequeñas y las posibilidades de ampliación modular. El éxito del despliegue de SMR en el próximo decenio podría alentar a más países en fase de incorporación a tomar en consideración estos reactores.

A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoeléctrica

A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua

Situación

31. Los reactores refrigerados por agua (WCR) han desempeñado un papel importante en el sector nuclear comercial desde sus comienzos, y la enorme mayoría de los reactores nucleares que se están construyendo actualmente en el mundo son reactores refrigerados con agua ligera.

32. Los WCR avanzados también están siendo tomados en consideración, estudiados y adoptados en medida creciente por diversos países, para el despliegue gradual de ciclos del combustible avanzados y más eficientes, ya sea parcial o totalmente cerrados. Varios Estados Miembros están realizando actividades de investigación y desarrollo (I+D) relacionadas con los reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR). Los diseños conceptuales del SCWR canadiense, un reactor de tubos de presión moderado por agua pesada, y del CSR1000 chino están terminados. En Europa se creó el concepto del reactor de agua ligera de alto rendimiento (HPLWR) y, en colaboración con China, se planificó, diseñó

y analizó una instalación de pruebas de cualificación del combustible en caliente. En la Federación de Rusia prosiguieron los estudios conceptuales de un reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (WWER) innovador, con parámetros supercríticos del agua de refrigeración, incluida la posibilidad de un núcleo de espectro rápido.

Tendencias

33. La mayoría de los reactores avanzados refrigerados por agua tienen potencias más elevadas, de entre 1000 y 1700 MW(e) por unidad en las construcciones recientes, y en la fase de diseño de los WCR grandes y evolutivos se ha seguido apuntando a nuevos aumentos. Hay una clara tendencia a preferir los emplazamientos con unidades múltiples de un mismo tipo de reactor o de tipos diferentes, dadas las posibilidades de economías de escala en los reactores nucleares comerciales. En los países que están estudiando la posibilidad de construir centrales nucleares, se piensa que los primeros reactores serán del tipo avanzado refrigerado por agua.

A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares y microrreactores

Situación

34. Al final de 2020, al menos 16 Estados Miembros tenían programas nacionales activos de diseño y desarrollo tecnológico de SMR, en su mayoría realizados en el marco de una colaboración internacional. Las actividades en todo el mundo encaminadas a desarrollar la tecnología de los SMR para el despliegue a corto plazo arrojaron progresos tangibles. En la aplicación de esta tecnología⁵ hubo hitos importantes.

35. En la Federación de Rusia comenzó en mayo de 2020 la explotación comercial de la central nuclear flotante Akademik Lomonosov, con dos unidades KLT-40S, que había sido conectada a la red seis meses antes. En total, había en 2020 más de 70 diseños de SMR de las principales líneas tecnológicas en desarrollo para diferentes aplicaciones. En China, el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) (figura A-1), que producirá 210 MW(e) con dos módulos de reactor conectados a un sistema generador de turbinas de vapor, fue sometido a las pruebas funcionales de la puesta en servicio para el inicio de la explotación en 2021. En la Argentina, la construcción del prototipo del CAREM (figura A-2) está en una fase avanzada, y el objetivo es realizar la carga de combustible y la puesta en servicio y en marcha en el cuarto trimestre de 2024 a más tardar, para una producción bruta de 100 megavatios (térmicos) (MW(t)) y 30 MW(e). El CAREM es un SMR de tipo PWR integrado diseñado para funcionar en modo de circulación natural, con características de seguridad pasiva. El diseño fue elaborado con tecnología nacional, y al menos el 70 % de sus componentes y de los servicios conexos proceden de empresas argentinas.

⁵ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).



Fig. A-1. HTR-PM de China, sometido a la puesta en servicio funcional en caliente con miras a iniciar la explotación comercial en 2022. (Fotografía: Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías, Universidad de Tsinghua (China))



Fig. A-2. La construcción del CAREM en un emplazamiento adyacente a la central nuclear Atucha II/Néstor Carlos Kirchner de la Argentina está en una etapa avanzada, y en 2024 comenzará la explotación con vistas a producir 30 MW(e) como demostración del prototipo. (Fotografía: CNEA)

36. En China inició la preparación del emplazamiento para el ACP100 de 125 MW(e), conocido también como Linglong 1, un PWR integrado diseñado como pequeño reactor de potencia polivalente. Tras unos cinco años de construcción, está previsto ponerlo en servicio y en marcha en 2025 para la generación de electricidad, calor industrial y agua desalada. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) otorgó la aprobación de certificación del diseño del SMR de 50 MW(e) de NuScale Power, un PWR integrado con circulación natural y características de seguridad

completamente pasiva. Posteriormente, la empresa elevó el valor nominal del Módulo de Potencia de NuScale (NPM) a 60 MW(e), antes de anunciar un nuevo aumento de la potencia nominal a 77 MW(e), para lo cual tiene previsto solicitar la aprobación de certificación del diseño en 2022. El NPM genera potencia en incrementos que pueden llegar a 924 MW(e) brutos en una misma central nuclear. Se prevé que la construcción del primer NPM comenzará en los próximos años, para iniciar las operaciones en el Laboratorio Nacional de Idaho en 2030.

37. La Arabia Saudita y la República de Corea terminaron juntas la labor previa de ingeniería de un proyecto referente a un reactor modular avanzado integrado (SMART), que se tradujo en un informe preliminar de análisis de la seguridad de un PWR integrado de 110 MW(e) (365 MW(t)), cuyo diseño es propiedad de ambos países. Se ha solicitado la aprobación de una modificación del diseño del SMART, en preparación para el diseño de ingeniería detallado con vistas a su construcción futura. El Japón publicó la Estrategia para el Crecimiento Verde por medio de la Neutralidad en Carbono para 2050, que incluye detalles sobre el apoyo activo que el Gobierno del Japón presta a la colaboración internacional en cuanto a la demostración de las tecnologías de los SMR.

38. Francia siguió desarrollando el NUWARD, un SMR basado en un PWR de 340 MW(e) que se compone de 2 módulos de reactor de 170 MW(e), con miras a sustituir durante el próximo decenio, por medio de esta tecnología, las centrales eléctricas alimentadas por carbón que están envejeciendo. El NUWARD se caracteriza por usar la convección forzada y disponer de unos sistemas de seguridad avanzados. De igual modo, el Reino Unido siguió trabajando en el desarrollo de la tecnología de su SMR, un diseño de reactor modular pequeño basado en un PWR de tres bucles de 450 MW(e), para su despliegue interno e internacional en 2030 a más tardar.

39. En la Federación de Rusia, se está estudiando la posibilidad de construir el RITM-200 de 50 MW(e), un PWR integrado diseñado y desplegado inicialmente para buques rompehielos nucleares, como SMR terrestre.

40. La hoja de ruta del Canadá relativa a los SMR incluye posibles aplicaciones para la sustitución, con y sin conexión a la red, de las plantas productoras de diésel y combustibles fósiles, incluidas las de los sectores petrolero y minero. Al menos 12 diseñadores/proveedores de SMR han solicitado a la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN) que proceda al examen de los diseños de los conceptos de reactor propuestos por los proveedores, incluidos los de reactores rápidos refrigerados por metal, los de reactores de sales fundidas, los de reactores refrigerados por gas y los de reactores integrados refrigerados por agua. Global First Power ha solicitado una licencia de preparación del emplazamiento para un SMR refrigerado por gas de 15 MW(t) en los Laboratorios de Chalk River. El proyecto tiene en cuenta tanto la generación eléctrica como el suministro de calor industrial. Ontario Power Generation (OPG) señaló recientemente que se encuentra inmersa en el proceso de selección de un SMR para su instalación en el emplazamiento del nuevo proyecto nuclear de Darlington, en Clarington, Ontario; OPG prevé presentar la solicitud de la licencia de construcción en 2022, siempre y cuando obtenga los permisos a nivel provincial.

Tendencias

41. Las actividades de desarrollo de un subconjunto de SMR conocidos como microrreactores se intensificaron en varios países, entre ellos el Canadá, los Estados Unidos de América, el Japón, el Reino Unido y la República Checa. Si bien todavía no hay consenso a escala mundial sobre la definición y el intervalo de potencias de los microrreactores modulares (MMR), existe un acuerdo general de que serán adecuados para la cogeneración de calor y electricidad en regiones remotas o en islas pequeñas, y/o para sustituir a los generadores diésel. Un concepto sujeto al proceso de solicitud ante la Comisión Reguladora Nuclear de la licencia de construcción para un proyecto en un emplazamiento del Departamento de Energía es el reactor de espectro de neutrones rápidos Aurora de 1,5 MW(e) desarrollado por Oklo, una empresa emergente de los Estados Unidos de América. En el Canadá, el MMR de la Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC), con un gas de alta temperatura y un núcleo dotado de bloques prismáticos, diseñado para producir 15 MW(t) o unos 5 MW(e), ha completado la primera fase del examen del diseño del proveedor por la CCSN y está siendo sometido a la segunda fase del examen; y el U-Battery de URENCO, un reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas diseñado para generar 4 MW(e) a partir de 10 MW(t) como reactor de potencia polivalente, va a ser objeto de la primera fase del examen del diseño del proveedor por la CCSN.

42. El interés de los Estados Miembros por los reactores de sales fundidas va en aumento, con un creciente número de novedades en esta esfera. La tecnología de estos reactores ofrece al diseñador una gran flexibilidad, que se plasma en muchas posibilidades de conceptos diferentes, como los reactores térmicos y los reactores rápidos. Hay reactores de sales fundidas diseñados como SMR y como centrales nucleares grandes. Algunos desarrolladores de reactores de sales fundidas tienen previsto desplegar sus diseños dentro del próximo decenio. El reactor de sales fundidas compacto (CMSR) desarrollado por Seaborg Technologies en Dinamarca completó la fase de diseño básico y la primera etapa de la aprobación reglamentaria. En el Canadá, dos diseños de reactores de sales fundidas están siendo objeto del proceso de examen del diseño del proveedor que lleva a cabo la CCSN antes de conceder la licencia: el reactor integrado de sales fundidas de Terrestrial Energy (IMSR-400, de 195 MW(e)) se encontraba en la segunda fase del examen del diseño del proveedor por la CCSN y el reactor estable de sales fundidas que recicla residuos nucleares de Moltex Energy (SSR-W300), diseñado en el Canadá y el Reino Unido, estaba pasando de la fase del diseño conceptual a la del diseño del nivel de los sistemas y se encontraba en la primera fase del examen del diseño del proveedor por la CCSN. Varios otros conceptos de reactores de sales fundidas se encuentran en diferentes etapas del desarrollo en otros países y podrían ser desplegados en los próximos años.

43. Varios países iniciaron el desarrollo de reactores marinos. La Federación de Rusia elaboró cuatro diseños de SMR para unidades de potencia flotantes, y un diseño, 'SHELF', para una unidad de potencia sumergible en el mar. China tenía al menos un diseño, ACPR50S, para el suministro de electricidad a las plataformas marinas de extracción de petróleo y gas. Hacia el final de 2020, la República de Corea anunció el desarrollo de BANDI 60, una unidad de potencia flotante basada en un PWR.

44. El objetivo común del desarrollo de SMR es demostrar que la construcción modular permite reducir los costos iniciales de inversión gracias a las economías de escala de la producción en serie, y que la simplificación del diseño y los tiempos de construcción más breves pueden traducirse en planes de financiación asequibles. A fin de ayudar a los Estados Miembros a establecer una visión común de sus necesidades y requisitos específicos con respecto a la tecnología de los SMR, el Organismo puso en marcha la elaboración de los criterios y requisitos genéricos del usuario para el diseño y la tecnología de los SMR. El propósito de este documento es presentar un conjunto de requisitos económicos, técnicos y de política clave que ayuden a los países en fase de incorporación a evaluar las tecnologías de los reactores y, en su momento, elaborar un documento de licitación. Se espera que el éxito del despliegue de SMR en el próximo decenio aliente a un mayor número de países en fase de incorporación a tomarlos en consideración y a participar en la I+D correspondiente.

45. El Organismo fortaleció su apoyo a los Estados Miembros interesados en establecer sistemas energéticos híbridos sin emisiones de carbono que integren fuentes de energía renovable variable, SMR, el almacenamiento de energía y aplicaciones no eléctricas. Muchos países consideran que los SMR, que típicamente producen menos de 300 MW(e), podrían pasar a ser una fuente eficaz de electricidad sin emisiones de carbono en sustitución de las centrales a base de combustibles fósiles que están envejeciendo. Además, con el aumento de la proporción asignada a las energías renovables intermitentes en todos los continentes, los SMR se consideran adecuados tanto para el suministro de la electricidad de carga base como para el funcionamiento en régimen flexible, en sinergia con las energías renovables, a fin de garantizar la seguridad energética.

Iniciativas internacionales relacionadas con sistemas de energía nuclear innovadores

Establecido en 2000, el Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO) es un mecanismo fundamental para la cooperación internacional en la sostenibilidad de la energía nuclear, las estrategias a largo plazo y las innovaciones institucionales y técnicas.

En 2020, el INPRO publicó una serie de herramientas que permiten a los países realizar evaluaciones en línea del ciclo del combustible, en el marco de su nuevo **servicio de apoyo en materia de análisis para una energía nuclear más sostenible (ASENES)**.



También produjo un nuevo curso electrónico para apoyar a los expertos técnicos de todo el mundo en el uso de las herramientas y métodos de modelización de escenarios de energía nuclear, la evaluación comparativa de los sistemas y la planificación de la trayectoria hacia una energía nuclear sostenible. Además, puso en marcha un proyecto en colaboración basado en el servicio ASENES para crear estudios de casos sobre escenarios específicos de desarrollo sostenible con reactores pequeños y medianos o modulares.

A.4.3. Sistemas de neutrones rápidos

Situación

46. Varios países con programas nucleoelectrónicos avanzados siguieron desarrollando sistemas de neutrones rápidos de conformidad con sus programas nacionales. En la Federación de Rusia continuó la explotación de dos reactores rápidos industriales refrigerados por sodio (SFR): el BN-600 (en funcionamiento desde 1980) y el BN-800 avanzado (puesto en marcha en 2016). El reactor BN-1200, en fase de diseño, será la continuación de esta serie de SFR rusos que apuntan a alcanzar los niveles más altos de seguridad establecidos para los reactores innovadores por el Foro Internacional de la Generación IV. La India está terminando la puesta en servicio de su prototipo del reactor reproductor rápido refrigerado por sodio. China explota desde 2010 el Reactor Experimental Rápido de China de 20 MW(e), también refrigerado por sodio. El CFR-600, un reactor innovador de tipo SFR, está en construcción desde 2017. Han comenzado las obras de construcción del segundo reactor de neutrones rápidos, de tipo piscina, refrigerado por sodio CFR-600 en el condado de Xiapu, en Fujian (China). También conocido con el nombre de proyecto de demostración del reactor rápido de Xiapu, el CFR-600 forma parte del plan de China para lograr un ciclo del combustible nuclear cerrado. Francia, pese a su largo historial de desarrollo y explotación de reactores refrigerados por sodio, aplazó los planes de construir un prototipo de SFR innovador (el reactor avanzado refrigerado por sodio para demostración industrial (ASTRID)), centrándose en cambio en un programa de I+D. El Japón ha promovido una competición entre distintas tecnologías de reactores de neutrones rápidos, incluidos SMR, para lo cual ha llevado a cabo estudios de viabilidad en el marco de su Programa de Energía Nuclear x Promoción de la Innovación (NEXIP), como primera fase de su Hoja de Ruta Estratégica para el Desarrollo de Reactores Rápidos. El siguiente objetivo de la hoja de ruta es la demostración de la tecnología en pleno siglo XXI.

47. En la Federación de Rusia, el BREST-OD-300 refrigerado por plomo y el SMR SVBR-100 refrigerado por una mezcla de plomo y bismuto se encontraban en la fase de concesión de la licencia. Algunos países de la Unión Europea estaban desarrollando conjuntamente el reactor rápido avanzado europeo de demostración refrigerado por plomo (ALFRED), que Rumania ha ofrecido construir en el emplazamiento de Mioveni. En el Reino Unido estaba pendiente el examen del diseño de

la central basada en el reactor sueco avanzado refrigerado por plomo (SEALER) de 55 MW(e) (SEALER-Reino Unido) por el Departamento de Empresas, Energía y Estrategia Industrial del país.

48. En 2020, General Atomics y Framatome anunciaron conjuntamente un nuevo diseño conceptual de un reactor modular rápido refrigerado por helio de 50 MW(e). La Unión Europea siguió desarrollando ALLEGRO, un reactor rápido refrigerado por helio de carácter experimental. TerraPower y GE Hitachi Nuclear Energy anunciaron Natrium (figura A-3), una nueva tecnología híbrida avanzada que comprende un SFR de 345 MW(e) combinado con un sistema de generación de energía con sales fundidas que puede elevar la producción total a 500 MW(e).



Fig. A-3. Tecnología híbrida avanzada Natrium desarrollada por TerraPower y GE Hitachi Nuclear Energy. (Fuente: TerraPower)

Tendencias

49. Casi todos los nuevos conceptos y diseños innovadores con neutrones rápidos que se han propuesto son SMR. Junto con la tecnología madura del sodio, se están desarrollando nuevos diseños y conceptos de reactores rápidos. Además, ha aumentado el interés por los reactores rápidos refrigerados por metales líquidos pesados, como el plomo y la mezcla eutéctica de plomo-bismuto. El helio es otro refrigerante posible para los sistemas de neutrones rápidos. Si bien estos sistemas tienen que superar todavía algunos retos tecnológicos, se considera que el principal obstáculo para el despliegue será su competitividad económica. Aun así, el potencial de estos reactores de reducir considerablemente el volumen, la toxicidad y el período de actividad de los desechos radiactivos y de obtener más energía a partir del combustible nuclear, combinado con la aparición de nuevos conceptos, siguieron impulsando su desarrollo tecnológico.

A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrónica

Situación

50. Un total de 64 reactores nucleares de potencia operativos generaron 3396,4 gigavatios-horas de equivalente eléctrico del calor para aplicaciones no eléctricas: 56 reactores apoyaron la calefacción urbana y las aplicaciones de calor industrial y 8, la desalación.

64 reactores nucleares
de potencia operativos
generaron **3396,4** GW-h



de equivalente eléctrico del calor
en apoyo de la cogeneración nuclear
para aplicaciones no eléctricas



56

apoyaron la calefacción urbana
y aplicaciones de calor industrial



8

apoyaron
la desalación

Producción de hidrógeno

51. En el sector de la producción nuclear de hidrógeno se registraron avances importantes.
52. Con respecto a la producción nuclear de hidrógeno, varios Estados Miembros prestaron más atención al uso de la energía eléctrica generada por los reactores de agua ligera fuera de las horas punta para producir hidrógeno. El Departamento de Energía de los Estados Unidos firmó contratos con las empresas de servicios públicos Energy Harbor, Xcel Energy y Arizona Public Service para demostrar la producción de hidrógeno en tres centrales nucleares en 2020 y 2021, en proyectos en que participan varios laboratorios nacionales. En el Reino Unido, EDF Energy está dirigiendo el proyecto 'Hidrógeno para Heysham (H2H)', destinado a producir hidrógeno con bajas emisiones de carbono utilizando la energía nucleoelectrónica.
53. En China, hubo avances en la labor de I+D para la producción nuclear de hidrógeno. El Instituto de Física Aplicada de Shanghái finalizó los ensayos a largo plazo de la pila de celdas electrolizadoras de óxido sólido (SOEC) de 5 kilovatios (kW), con un rendimiento estable, y creó una planta de producción de hidrógeno de 20 kW basada en la tecnología de la electrólisis de vapor a alta temperatura. Las nuevas metas se centraron en la fabricación de pilas y celdas electrolizadoras de óxido sólido, así como en proyectos de demostración de plantas de 200 kW y del orden de los megavatios, acopladas con un MSR de torio, para lograr la producción de hidrógeno a gran escala.
54. Los Laboratorios Nucleares Canadienses siguieron desarrollando la tecnología termoquímica híbrida de cobre-cloro para la producción nuclear de hidrógeno. La meta es crear un sistema integrado a escala de laboratorio con fines de demostración, con el objetivo de pasar posteriormente a un prototipo de planta. El Japón logró la producción continua y automatizada de hidrógeno en ciclo cerrado, por medio de procesos de termoquímicos de disociación del agua utilizando yodo y azufre, a tasas de hasta 30 litros/hora aproximadamente y por períodos de hasta 150 horas, lo que, en última instancia, permitirá producir hidrógeno a partir de calor a más de 900 grados Celsius, producido en el futuro en reactores de muy alta temperatura refrigerados por gas. Se obtuvieron datos importantes para investigar el comportamiento y la fiabilidad de los materiales y componentes, y para mejorar las técnicas de control de los fluidos y las reacciones necesarias para las operaciones a más largo plazo.

 los reactores nucleares de potencia pueden acoplarse con **H₂** plantas de producción de hidrógeno para producir de manera eficaz energía e hidrógeno como sistema de cogeneración.

Si los niveles actuales de producción de hidrógeno se alcanzaran utilizando energía nuclear, se eliminarían **~500 MILLONES** de toneladas de emisiones de CO₂ cada año.

55. En el sector de la calefacción urbana basada en centrales nucleares, la Federación de Rusia logró un avance importante con la puesta en servicio de la central nuclear flotante Akademik Lomonosov. Esta central puede suministrar electricidad a las plataformas de prospección petrolífera frente a la costa ártica de la Federación de Rusia, así como energía eléctrica a las plantas de desalación, para producir agua dulce, y calor para la calefacción urbana, según sea necesario. La central nuclear Akademik Lomonosov reemplazará gradualmente a la central nuclear de Bilibino (figura A-4), cuya explotación ha sido prolongada por otros cinco años. La central de Bilibino, una de las plantas de cogeneración nuclear más antiguas del mundo, suministra electricidad y calor a la ciudad de Bilibino. Otros países, como China y la República de Corea, anunciaron la intención de desarrollar sus propias centrales nucleares flotantes.

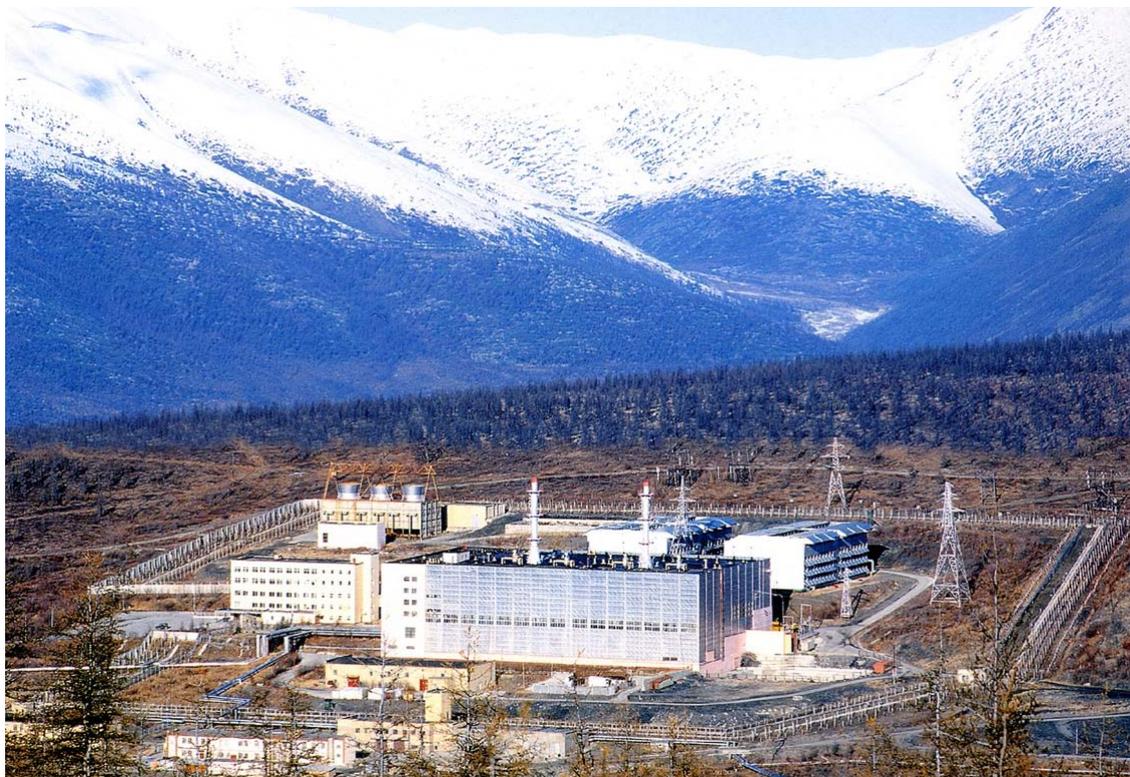


Fig. A-4. Central nuclear de Bilibino, utilizada para la cogeneración de calor y electricidad en la Federación de Rusia. (Fotografía: Rosenergoatom)

Tendencias

56. El uso de la energía nuclear para fines distintos de la producción de electricidad está cobrando un impulso sin precedentes en todo el mundo. Junto con cumplir la función de descarbonizar los sectores de consumo final, como el transporte, la industria o el sector residencial, la cogeneración nuclear está siendo vista cada vez más como una buena justificación económica para no retirar prematuramente del servicio las centrales nucleares no rentables, particularmente ante las crecientes proporciones asignadas a los sistemas de energía renovable variable en las redes de electricidad. En cuanto a la producción nuclear de hidrógeno con reactores refrigerados por agua, se prevé que el persistente interés llevará esta tecnología hasta la etapa comercial, especialmente si los proyectos de demostración dan buenos resultados.

57. Para ello, sin embargo, será necesario abordar primero los retos planteados por cuestiones infraestructurales relacionadas con el almacenamiento y el transporte del hidrógeno. Se espera que las enseñanzas extraídas de los proyectos que están realizando diferentes países aceleren la aplicación a mayor escala de la producción nuclear de hidrógeno por electrólisis convencional. También es probable que continúe el desarrollo de procesos de alta eficiencia para la producción nuclear de hidrógeno. El concepto del uso de la energía nuclear en aplicaciones no eléctricas, ya sea en plantas independientes, en la cogeneración o como parte de un sistema energético integrado con fuentes de energía renovable para aplicaciones polivalentes, será una tendencia a la que habrá que estar atentos en los próximos años. Esas aplicaciones incluyen la producción de agua dulce, la generación de hidrógeno como combustible y como vector energético, y la calefacción y refrigeración urbanas, para edificios residenciales y comerciales y para muchas otras industrias, como la fabricación de acero, la refinación petroquímica y la producción de combustibles sintéticos.

58. El Organismo ha creado el Programa de Evaluación Económica del Hidrógeno y el calculador del costo del hidrógeno, así como un juego de materiales sobre la producción nuclear de hidrógeno (*IAEA Toolkit for Nuclear Hydrogen Production*) para apoyar a los Estados Miembros en sus evaluaciones técnico-económicas de la producción de hidrógeno con energía nuclear, en comparación con otras opciones disponibles.

A.4.5. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión nuclear para la producción de energía en el futuro

Situación

59. La colectividad de expertos en la fusión nuclear celebró el comienzo del ensamblaje y la integración del ITER (figuras A-5 y A-6) después de más de diez años de complejas fases de construcción en que se preparó el emplazamiento y se diseñaron y fabricaron los principales sistemas y componentes. El avance hacia las operaciones de producción del primer plasma del proyecto ITER, programadas para diciembre de 2025, era de alrededor del 70 % al final de 2020. Cuando esté en funcionamiento, el ITER proporcionará gran parte de la base científica y tecnológica necesaria para el desarrollo y diseño de los futuros reactores de fusión capaces de producir energía.



*Fig. A-5. La base del criostato, de 1250 toneladas, fue el primer componente a gran escala instalado en el fondo del pozo de ensamblaje del Tokamak de 30 m de profundidad.
(Fotografía: Organización ITER)*



Fig. A-6. Una vez instalada la base, se bajó al fondo del pozo el cilindro inferior del criostato, de 375 toneladas, que se soldó a la base. (Fotografía: Organización ITER)

60. El Toro Europeo Común (JET), un tokamak con una potencia calorífica aumentada y una pared similar a la del ITER, se ha preparado para la campaña experimental del tritio, destinada a realizar ensayos y a poner a punto los experimentos siguientes con una mezcla en partes iguales de deuterio (D) y tritio (T). La campaña experimental DT del JET, cuyo inicio está previsto para el verano de 2021, proporcionará una base física y tecnológica excepcional para el funcionamiento del ITER. Uno de sus principales objetivos es generar 15 MW de potencia térmica durante alrededor de 5 segundos en condiciones estacionarias para estudiar los aspectos físicos fundamentales de la producción de energía de fusión.

61. En el ámbito del confinamiento inercial con láseres de alta potencia, la Instalación Nacional de Ignición de los Estados Unidos de América ha seguido mejorando los resultados experimentales mediante el aumento de la eficiencia del acoplamiento de la energía del láser con la energía absorbida por la cápsula de combustible, la detección de varias fuentes de fugas de energía y el desarrollo de técnicas de mitigación para poder realizar experimentos de mayor rendimiento. El aumento de la eficiencia de acoplamiento mejora las perspectivas de producción de energía.

Tendencias

62. La inversión pública y privada en la investigación y la tecnología de la fusión sigue aumentando. Ya son más de 90 los dispositivos de fusión financiados con fondos públicos que están en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación (figura A-7). Asimismo, más de 20 empresas del sector privado están investigando y desarrollando diversos dispositivos y enfoques de fusión a menor escala con diferentes combustibles, geometrías de confinamiento alternativas y nuevas tecnologías, como los imanes superconductores de alta temperatura.

63. El Departamento de Energía, la Comisión Reguladora Nuclear y la Asociación de la Industria de la Fusión de los Estados Unidos organizaron, en formato virtual, un Foro Público sobre el Marco Regulador para la Fusión. El propósito del foro era iniciar un diálogo sobre el marco regulador en que se examinaran los planes futuros de desarrollo y establecimiento de sistemas de reactores de energía de fusión de los sectores público y privado con el órgano regulador estadounidense así como con otros órganos reguladores nacionales.

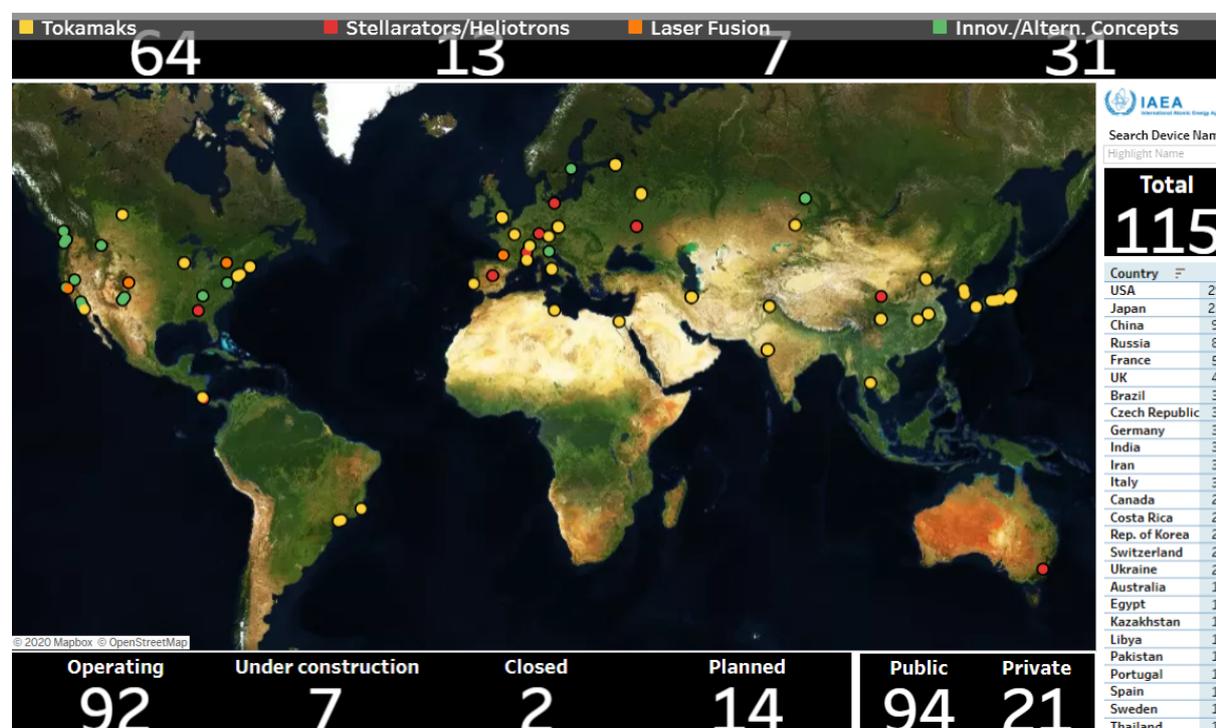


Fig. A-7. Actualmente hay más de 100 dispositivos de fusión (públicos y privados) en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación. (Fuente: [Fusion Device Information System](#))

64. En el marco de los nuevos planes referentes a los materiales y la tecnología, se están realizando experimentos específicos para abordar cuestiones relacionadas con el comportamiento de los materiales en condiciones de exposición al plasma y con la corrosión, como el experimento de exposición de materiales al plasma del Laboratorio Nacional de Oak Ridge de los Estados Unidos de América, y el programa ‘MAT’ del consorcio EUROfusion, en Europa. Además, a falta de instalaciones de irradiación específicas para la investigación sobre los materiales de fusión, se están obteniendo resultados importantes en las campañas de irradiación realizadas en reactores de investigación tales como el reactor de isótopos de alto flujo del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, en una colaboración de los Estados Unidos de América, el Japón y la Unión Europea.

65. La Oficina de Ciencias de la Energía de Fusión del Departamento de Energía asignó 18 millones de dólares de los Estados Unidos para financiar las operaciones y el apoyo a los usuarios en las instalaciones de láseres de alta intensidad de los Estados Unidos de América y el Canadá por conducto de ‘LaserNetUS’, una iniciativa establecida en 2018 para proporcionar a los científicos de las universidades y los laboratorios nacionales un mayor acceso a esas instalaciones. En el Japón, el Comité sobre la Estrategia de Fusión con Láser, integrado por unos 40 miembros procedentes de 20 institutos, está estudiando el desarrollo de un sistema de láseres de alta repetición para realizar el análisis de datos de los plasmas de fusión, así como los ensayos de ingeniería de los reactores de fusión con láser a partir de fuentes de neutrones basadas en reacciones de fusión. En el Canadá, General Fusion lleva desarrollando, desde hace diez años, tecnología de fusión de blancos por confinamiento magnético y ha anunciado públicamente sus planes para establecer una instalación de demostración. General Fusion ha solicitado a la CCSN actividades de información previas a la concesión de la licencia a fin de comprender cómo se desarrolla el proceso de solicitud de la licencia. La CCSN también está manteniendo conversaciones previas a la concesión de licencias con empresas emergentes que están tratando de llevar a cabo actividades de investigación y desarrollo en el campo de la fusión en el marco de iniciativas de desarrollo de la tecnología.

B. Ciclo del combustible nuclear

B.1. Parte inicial

Situación

66. Debido a la pandemia mundial de COVID-19, varios importantes productores de uranio suspendieron las operaciones o redujeron considerablemente la producción. Más del 90 % de la producción de uranio del mundo está concentrada en Australia, el Canadá, la Federación de Rusia, Kazajistán, Namibia (figura B-1), el Níger y Uzbekistán. Dada la reducción en la producción mundial de uranio, la escasez de la oferta —un déficit que fue compensado con suministros secundarios— dio lugar a un aumento del 41 % de los precios al contado en el primer trimestre de 2020. Sin embargo, no se alcanzó el nivel requerido para reanudar la explotación de minas inactivas o desarrollar nuevas minas de uranio. En el tercer trimestre de 2020, los precios al contado del uranio disminuyeron alrededor de un 15 %, al reanudarse en septiembre la extracción en la mina canadiense de uranio de Cigar Lake (el mayor productor de uranio del mundo), tras una parada de cinco meses causada por la pandemia mundial.



*Fig. B-1. Vista aérea de la mina de uranio a cielo abierto de Husab, en Namibia.
(Fotografía: Swakop Uranium)*

67. Los combustibles a prueba de accidentes o los combustibles de tecnología avanzada que se están desarrollando en los Estados Unidos de América, Europa, el Japón y la Federación de Rusia requieren en algunos casos enriquecimientos más altos de uranio 235 para compensar la pérdida de transparencia electrónica en las vainas. Por ello, se están ensayando combustibles de uranio poco enriquecido de alta concentración, con un enriquecimiento superior al 5 % pero inferior al 20 %.

68. Durante el año se efectuó la primera carga de conjuntos combustibles a prueba de accidentes de Global Nuclear Fuel en un reactor estadounidense. Los conjuntos para los ensayos iniciales, con las soluciones combustibles a prueba de accidentes 'IronClad' y las vainas revestidas de circonio 'ARMOR' de la empresa, fueron instalados en la central nuclear de Exelon en Clinton, en los Estados Unidos de América.

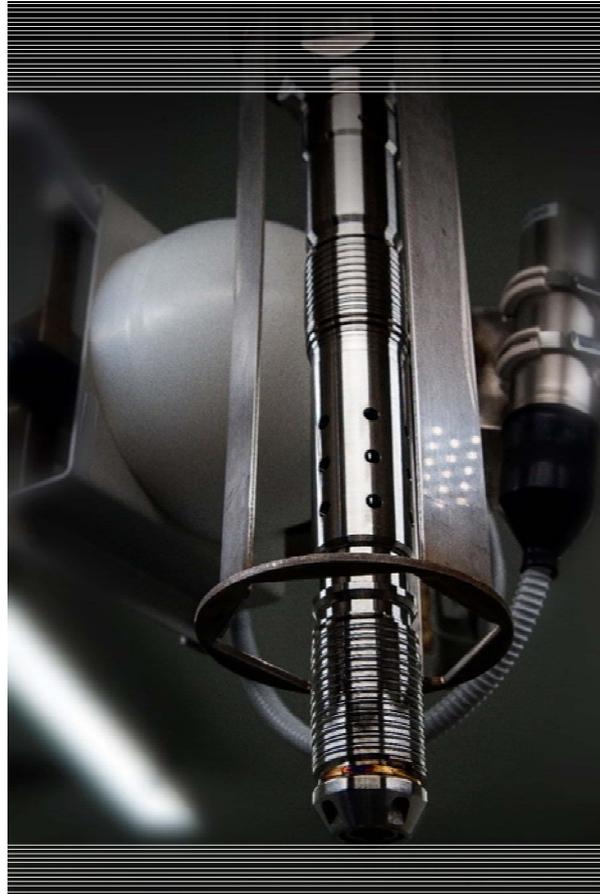
69. Los primeros conjuntos combustibles nucleares fabricados en Rusia con barras de combustible experimentales a prueba de accidentes, para reactores comerciales, superaron la inspección de aceptación en la Instalación de Concentrados Químicos de Novosibirsk, una planta de fabricación de la Compañía de Combustible TVEL, la filial de Rosatom que produce combustible. Las barras de combustible se cargaron en una de las unidades WWER-1000 de la central nuclear de Rostov de la Federación de Rusia.

70. Los conjuntos combustibles a prueba de accidentes para el ensayo inicial instalados en la Unidad 1 de la central nuclear Edwin I. Hatch de Southern Nuclear a comienzos de 2018 completaron un ciclo del combustible de 24 meses, y ahora se estudiará una muestra de esas barras del ensayo inicial. Ya ha concluido una primera inspección de las barras. Las propiedades del material y las vainas serán evaluadas más a fondo en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge del Departamento de Energía.

71. En Bélgica se instalaron los conjuntos de ensayo inicial del combustible a prueba de accidentes EnCore en la Unidad 4 de la central nuclear de Doel de ENGIE Electrabel. Doel 4 es el segundo reactor comercial del mundo, y el primero de Europa, en que se han instalado los conjuntos EnCore.

72. TerraPower anunció la intención de asociarse con el proveedor de combustible y servicios nucleares Centrus Energy para establecer una capacidad de producción nacional, a escala comercial, del combustible de uranio poco enriquecido de alta concentración. Esto será necesario para alimentar muchos diseños de reactores de la próxima generación, incluido el sistema de almacenamiento de energía eléctrica Natrium anunciado recientemente, diseñado por TerraPower y GE Hitachi Nuclear Energy.

73. El Complejo Minero y Químico de Zheleznogorsk (Federación de Rusia) terminó la fabricación del primer lote de recarga completa del combustible de óxidos mixtos (MOX) de uranio-plutonio (figura B-2) para la Unidad 4 de la central nuclear de Beloyarsk de la Federación de Rusia. Los 169 conjuntos combustibles han sido aceptados por el explotador, Rosenergoatom, y su representante autorizado ZAES.



*Fig. B-2. Conjunto combustible de óxidos mixtos para el reactor rápido BN-800.
(Fotografía: Complejo Minero y Químico, Federación de Rusia)*

74. Los Laboratorios Nucleares Canadienses concertaron cuatro acuerdos de colaboración con desarrolladores de tecnología de SMR en el marco de la Iniciativa Canadiense de Investigación Nuclear. El primero se ha concertado con USNC-Power, una filial de la USNC, y atañe a las investigaciones en apoyo del microreactor modular de la USNC. El proyecto incluirá actividades de investigación relacionadas con la fabricación del combustible microencapsulado completamente cerámico de la USNC. El segundo se ha concertado con Moltex Energy, del Reino Unido, para llevar a cabo trabajos en apoyo de algunos aspectos del programa de desarrollo de combustible nuclear de Moltex Energy para su reactor estable de sales fundidas, un SMR de 300 MW(e). El tercero se ha concertado con Kairos Power, de los Estados Unidos de América, y hace referencia a actividades de investigación e ingeniería relacionadas con tecnologías para mejorar la separación, el análisis y el almacenamiento del tritio generado empleando el diseño de SMR propuesto por Kairos Power. El cuarto acuerdo se ha concertado con Terrestrial Energy con el objetivo de desarrollo y probar técnicas que permitan estudiar el comportamiento del combustible líquido propuesto que se utilizará en el diseño de reactor integrado de sales fundidas de Terrestrial Energy.

75. Holtec International seleccionó a Framatome como proveedor de combustible nuclear para su reactor SMR-160. Las empresas han suscrito un acuerdo que permitirá llevar a cabo toda la labor de ingeniería necesaria para alimentar el SMR-160 con el conjunto combustible GAIA 17x17 de Framatome, ya probado y disponible en el comercio.

76. En el reactor de investigación del Laboratorio del Reactor Nuclear del Instituto Tecnológico de Massachusetts comenzó la irradiación del combustible tri-isotrópico (TRISO) de X-Energy, TRISO-X. Los datos de los ensayos de irradiación ayudarán a respaldar las solicitudes de licencias para el Xe-100 de X-Energy y otros reactores que utilizan el combustible TRISO.

77. La USNC estableció una nueva instalación en Salt Lake City, Utah (Estados Unidos de América), para apoyar el desarrollo de su combustible microencapsulado completamente cerámico patentado, un diseño de combustible TRISO de partículas de oxocarburo de uranio de la próxima generación, en que la matriz de grafito utilizada por 50 años en el combustible TRISO tradicional ha sido sustituida por carburo de silicio. Los materiales fabricados en la nueva instalación se emplearán en el microrreactor modular de la USNC y en otros reactores nucleares, como los refrigerados por gas, los de agua ligera, los CANDU y los refrigerados por sales fundidas.

78. La firma de un contrato con la Corporación Industrial China de Energía Nuclear (CNEIC) para el transporte del uranio poco enriquecido (UPE) y/o del equipo necesario para el funcionamiento del Banco de UPE del OIEA creó una segunda ruta de transporte desde y hacia el Banco. El Banco de UPE del OIEA, situado en Kazajistán, comenzó a funcionar en octubre de 2019. Los otros mecanismos de garantía del suministro existentes se describen en el *Examen de la Tecnología Nuclear — 2012* (documento GC(56)/INF/3).

Tendencias

79. Globalmente, la oferta primaria de uranio fue menor en 2020, con una producción pronosticada en alrededor de 46 500 toneladas. Esto representa aproximadamente el 69 % de la demanda mundial de uranio, lo que significa que las necesidades de uranio como combustible nuclear deberán cubrirse en mayor medida con suministros secundarios.

80. Para garantizar un suministro sostenible de combustible nuclear a las centrales nucleares actuales y del futuro, el mundo necesitará más minas de uranio. Sobre la base de los registros históricos, se prevé que, debido a restricciones económicas, técnicas, ambientales o sociales, serán muy pocos los yacimientos identificados de uranio que avancen hasta las fases de extracción y producción. Por lo tanto, habrá que innovar para poner en producción los yacimientos marginales. Un ejemplo de esta innovación en el sector de la minería del uranio en 2020 fue la evaluación, aún en curso, de las tecnologías de recuperación *in situ* en un yacimiento de alta ley asociado con una discordancia.

81. Los métodos de biolixiviación son otra innovación importante que se está desarrollando para la recuperación *in situ* del uranio de los yacimientos asociados con areniscas. China ha investigado esta tecnología en el último decenio para mejorar la recuperación y la rehabilitación en estos tipos de yacimiento.

82. El uso de combustible de quemado elevado en el parque de centrales nucleares existente se considera una opción para mejorar la sostenibilidad del ciclo del combustible, ya que el aumento del grado de quemado antes de la extracción reduce el consumo anual de uranio natural.

B.2. Parte final

Situación

83. Según la retroinformación recibida de la Red OPEX COVID-19 del Organismo, el funcionamiento de las instalaciones de almacenamiento de combustible gastado no sufrió mayormente los efectos de la pandemia, salvo ciertas interrupciones del servicio relacionadas con el combustible que en algunos casos causaron retrasos. El combustible nuclear gastado almacenado se está acumulando a nivel mundial a una tasa del orden de 7000 toneladas de metal pesado por año, y el inventario almacenado se está acercando a las 300 000 toneladas de metal pesado.

84. En el Japón se extrajo el combustible MOX gastado en la central nuclear de Ikata, en la primera operación de ese tipo realizada en el país, y un mes después en la central nuclear de Takahama. Las barras de combustible MOX gastado se almacenarán temporalmente en una piscina de enfriamiento. El Gobierno del Japón está llevando a cabo actividades de I+D relacionadas con el reprocesamiento de este combustible gastado, de conformidad con lo dispuesto en su política energética.

85. Para los países con programas nucleares de larga data que están aplicando estrategias de ciclo abierto, el principal reto está dado por la decreciente capacidad de almacenar el combustible nuclear gastado en los emplazamientos y el aumento de la duración del almacenamiento (más de 100 años).

86. En enero de 2020 se aprobó la ampliación de la capacidad de almacenamiento en seco en la central nuclear de Wolsong de la República de Corea. Este fue un paso importante, porque la capacidad de almacenamiento existente estaba casi totalmente utilizada.

87. La NRC hizo público un borrador de la evaluación del impacto ambiental referente a la instalación de almacenamiento provisional centralizado que está previsto construir en Nuevo México (Estados Unidos de América).

88. Con la entrega del último cofre de almacenamiento de combustible nuclear gastado un año antes de lo programado, la central nuclear de Ignalina, en Lituania, que está en régimen de parada, alcanzó su plena capacidad de gestionar y almacenar en condiciones de seguridad, dentro de su emplazamiento, todo el combustible nuclear gastado de sus dos reactores RBMK-1500.

Tendencias

89. El Organismo coordina actividades de investigación encaminadas a comprender mejor el comportamiento del combustible nuclear gastado en los diversos sistemas de almacenamiento a lo largo del tiempo, y los mecanismos de envejecimiento y degradación de los propios sistemas. Esto ayudará a comprobar que las condiciones de almacenamiento del combustible nuclear gastado siguen siendo seguras y que ese combustible puede transportarse a una instalación de reprocesamiento y disposición final.

90. Los aumentos de eficiencia en la gestión de los reactores nucleares se han traducido, con el tiempo, en una menor descarga de combustible nuclear gastado de esos reactores. Sin embargo, esto se ha logrado con mayores enriquecimientos iniciales y con quemados más elevados, lo que ha supuesto un mayor calor residual y un aumento de los riesgos de fragilización de las vainas, que podrían tener un impacto en las medidas de gestión del combustible nuclear gastado.

91. Los nuevos diseños de combustible que se desplegarán en el futuro próximo, con enriquecimientos mayores de hasta el 8 % y vainas revestidas, podrían plantear retos para los sistemas de almacenamiento existentes, ya que habrá que entender sus comportamientos a plazo más largo para poder analizar debidamente la seguridad de todos los pasos de la gestión del combustible nuclear gastado, es decir, del almacenamiento, el transporte y la disposición final.

92. Algunos países consideran el combustible gastado como un recurso energético valioso, y se están realizando avances en las tecnologías de reciclaje. Los procesos avanzados de reciclado múltiple del plutonio (CORAIL y MIX en Francia, y REMIX en la Federación de Rusia) en reactores de agua ligera están siendo aplicados en actividades de demostración con vistas a adoptar estrategias de reciclado múltiple del plutonio en los reactores rápidos. Se espera que estos combustibles reciclados permitan un uso más eficaz de los recursos naturales, reduzcan el volumen y la radiotoxicidad de los desechos nucleares generados y atenúen los riesgos de proliferación.

C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos

C.1. Clausura

Situación

93. En 2020 fueron puestos en régimen de parada definitiva seis reactores nucleares de potencia: las Unidades 1 y 2 de Fessenheim, en Francia, Leningrad 2 en la Federación de Rusia, y Duane Arnold 1 e Indian Point 2, en los Estados Unidos de América, y Ringhals 1 (un BWR de 881 MW(e)), en Suecia. Este número fue inferior al de 2019, cuando se retiraron del servicio 13 reactores. Al final de 2020 estaban en régimen de parada o en proceso de clausura un total de 171 reactores. En 20 de ellos ya había terminado la clausura. También había en el mundo 158 instalaciones del ciclo del combustible y 125 reactores de investigación en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura. Alrededor de 131 instalaciones del ciclo del combustible y 446 reactores de investigación habían concluido la clausura.

Reactores de potencia



Instalaciones del ciclo del combustible



Reactores de investigación



94. Los mayores programas de clausura de centrales nucleares ejecutados durante el año fueron los de Alemania, el Japón y los Estados Unidos de América. En Alemania estaban en proceso de clausura 26 centrales nucleares, y las 6 restantes que aún están funcionando serán puestas en régimen de parada definitiva antes del final de 2022. Tras haber recibido las licencias correspondientes en 2019, comenzó la clausura de la Unidad B de Gundremmingen y de la Unidad 2 de Philippsburg. En el Japón, el gran terremoto de la región oriental de 2011 condujo a la parada definitiva de una proporción importante del parque nuclear del país. En 2020, 24 de las 60 centrales nucleares comerciales del Japón estaban ya sea en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura. En los Estados Unidos de América, donde varios reactores han sido puestos en régimen de parada definitiva en el último decenio por falta de rentabilidad, había 18 programas de clausura activos. De esas instalaciones, siete estaban aplicando una estrategia de desmantelamiento inmediato, otras siete estaban en confinamiento seguro y las cuatro restantes estaban haciendo la transición del confinamiento seguro al desmantelamiento inmediato. Tres centrales estadounidenses tenían programado ultimar la clausura en 2020: La Crosse, en Wisconsin, Humboldt Bay, en California, y Zion, en Illinois.

95. En los proyectos de clausura de Chornóbil y de Fukushima hubo progresos importantes. En septiembre de 2020 comenzaron los ensayos calientes en la nueva Instalación de Almacenamiento Provisional de Combustible Nuclear Gastado (figura C-1) adyacente a la central nuclear de Chornóbil, a la vez que entraba en funcionamiento la instalación destinada a liberar los desechos del control reglamentario, con una capacidad de producción de diez toneladas diarias.



Fig. C-1. El primer contenedor blindado de doble pared, cargado con 93 conjuntos combustibles gastados, abandona la instalación de procesamiento del combustible gastado con destino al lugar de almacenamiento por 100 años.

(Fotografía: Empresa Estatal Especializada de la central nuclear de Chornobyl)

96. El Japón comunicó que en agosto de 2020 había concluido el tratamiento completo del agua con un contenido reducido de estroncio, que había estado almacenada en tanques a la espera de ser tratada en el Sistema Avanzado de Procesamiento de Líquidos (ALPS), e informó de que los tanques se reutilizarían para almacenar el agua tratada con este sistema. El Gobierno del Japón sigue estudiando varias opciones para la gestión del agua tratada en el ALPS, incluida la liberación de vapor o la descarga en el mar, pero aún no ha adoptado una decisión definitiva.

97. En Francia avanzó la clausura en el emplazamiento de La Hague (figura C-2), donde se trabajó en el desmantelamiento de la planta de reprocesamiento UP2-400 de Orano. Grupos de trabajadores iniciaron la recuperación de 600 toneladas de desechos históricos de grafito y magnesio almacenados en silos de hormigón, guiados por un sistema de clasificación que utiliza tecnología basada en la inteligencia artificial, mientras proseguían las actividades de desmantelamiento en la planta principal. Finalizó el desmantelamiento de las cajas de guantes secas del taller de acabado de plutonio. Se dio inicio a otras operaciones para desmantelar un segundo recipiente de lixiviación del antiguo edificio de disolución y extracción, así como las celdas calientes mecánicas del antiguo taller de fabricación de fuentes de cesio. Las celdas químicas de este taller se desmantelaron durante los tres años anteriores utilizando equipo accionado a distancia.



*Fig. C-2. Vista aérea del emplazamiento de Orano en La Hague, Normandía (Francia).
(Fotografía: Orano)*

98. Électricité de France inició la construcción de una instalación de demostración de la clausura de reactores de grafito. Se espera que esta instalación comience a funcionar en 2022 para facilitar el ensayo de las tecnologías de desmantelamiento de los reactores moderados por grafito. En la Federación de Rusia, Rosatom tenía planes de aplicar una estrategia de enterramiento para la clausura de sus primeros reactores de uranio y grafito a título excepcional, y está construyendo un centro de demostración para poner a prueba este enfoque. La entrada en servicio de esta instalación está prevista para 2021.

99. Sogin, la empresa pública italiana encargada de las actividades de clausura, inició las actividades preliminares para la clausura del reactor de investigación ISPRA-1 en el emplazamiento del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea.

Tendencias

100. Mientras que en los decenios pasados el desmantelamiento diferido fue la estrategia de clausura adoptada por la mayoría de los propietarios de instalaciones, ahora está cobrando apoyo el enfoque del desmantelamiento inmediato. Además, los plazos para el inicio del desmantelamiento final de las centrales retiradas del servicio se han venido acortando cada vez más, con la sustitución de varias estrategias de desmantelamiento diferido por planes de desmantelamiento inmediato. Este cambio ha sido impulsado por el deseo de reducir las incertidumbres con respecto a los costos de la clausura.

101. Está aumentando la intervención de consorcios especializados en clausuras y gestión de desechos que ofrecen ejecutar proyectos de clausura completos. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América hay casos en que la empresa está transfiriendo la responsabilidad de la licencia y todos los fondos para la clausura a un consorcio, que asume la responsabilidad completa de la ejecución del proyecto.

102. Otra tendencia es el mayor uso de la digitalización, la robótica y la automatización, por ejemplo para la planificación y la simulación, la gestión de la configuración de la planta y la gestión del conocimiento, así como para apoyar la recuperación de desechos, la caracterización y el desmantelamiento.

103. En muchos casos, la ausencia de una solución de disposición final para el combustible nuclear gastado o de un repositorio para los desechos radiactivos obstaculiza el avance de la clausura. En vista de ello, se está recurriendo ampliamente a la construcción de instalaciones de almacenamiento del combustible gastado y los desechos radiactivos dentro o cerca del emplazamiento de las centrales en

proceso de clausura, para poder avanzar en la clausura aun cuando no se disponga de instalaciones para la disposición final de esos materiales. Por ejemplo, la empresa de almacenamiento provisional BGZ de Alemania está asumiendo la responsabilidad total del almacenamiento a largo plazo del combustible gastado y los desechos radiactivos, para que las instalaciones puedan ser desmanteladas lo antes posible.

C.2. Rehabilitación ambiental

Situación

104. En 2020, las actividades de rehabilitación se vieron limitadas por la pandemia de COVID-19. Aun así, continuaron las obras de rehabilitación en los emplazamientos en que había riesgos importantes para las personas o el medio ambiente o un potencial de reutilización económica del lugar.

105. En el emplazamiento de Shekaftar, en Kirguistán, comenzó la rehabilitación tras el cierre de seis pozos y el traslado de cinco pilas de roca estéril a otro lugar de acumulación de esos desechos en una localidad más distante. Habrá que retirar y estabilizar en otro lugar unos 700 000 metros cúbicos de desechos de las operaciones mineras situados alrededor de la aldea local para asegurar la protección de las personas y el medio ambiente. Los trabajos fueron financiados a través de la Cuenta de Rehabilitación Ambiental para Asia Central, del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo, y forman parte del Plan Maestro Estratégico más amplio para la rehabilitación ambiental de los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Asia Central. En 2020, continuaron según lo previsto los proyectos de rehabilitación ambiental en Kirguistán (emplazamiento de Min-Kush) y Tayikistán (Monte Amarillo y acumulaciones de colas 1 a 4 de Istiqlol), que se enmarcan en el programa intergubernamental de la Comunidad de Estados Independientes sobre rehabilitación.

106. En los Estados Unidos de América, finalizó la retirada de las restantes losas de construcción del emplazamiento de la antigua Planta de Difusión Gaseosa de Oak Ridge (figura C-3), lo que permitirá llevar a cabo el proceso de aprobación reglamentaria para la liberación del emplazamiento y su desarrollo económico por la comunidad local. Con la terminación de las obras se liberarán más de 500 ha de tierras para su reutilización en el Parque Histórico Nacional del Proyecto Manhattan.



Fig. C-3. Avances en las obras de rehabilitación del antiguo emplazamiento de la Planta de Difusión Gaseosa de Oak Ridge, en Tennessee (Estados Unidos de América). (Fotografía: Departamento de Energía, Estados Unidos de América)

Tendencias

107. Los esfuerzos dedicados a las tecnologías de caracterización y monitorización siguieron apoyando la transición hacia la gestión y el control a largo plazo como solución optimizada para muchos emplazamientos.

108. La principal tendencia observada en 2020 fue la mayor aplicación del concepto de la economía circular a la gestión de los residuos de los materiales radiactivos naturales. En este contexto, el interés se centra en el recurso secundario reutilizable, al objeto de conservar los recursos primarios. Un ejemplo importante de esta tendencia es la reciente autorización, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, del uso del fosfoyeso en los proyectos de construcción de caminos del Gobierno. Para que prosperen los enfoques de este tipo, se requerirán asociaciones constructivas capaces de generar soluciones innovadoras que tengan en cuenta también las dimensiones sociales y reglamentarias.

109. En el proyecto de desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado de exploración y monitorización de las antiguas minas de producción de uranio por espectrometría gamma (DUB-GEM) se realizó el primer vuelo de prueba. Este proyecto de investigación, financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania, tiene por objeto respaldar la caracterización de los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Asia Central. En general, el uso de espectrómetros gamma relativamente pequeños en drones de dimensiones reducidas se ha concentrado en el estudio de zonas muy contaminadas. Sin embargo, se está investigando también el empleo de esta configuración para el estudio de niveles bajos de contaminación radiactiva. Los nuevos sistemas explorarán el uso de detectores de mayor volumen, de drones capaces de despegar con un peso más grande, de hasta 25 kg, y de nuevos materiales de cristales centelleantes como el bromuro de cerio. El desarrollo de esta tecnología facilitará el estudio rápido de la contaminación radiactiva en regiones montañosas, que pueden ser de difícil acceso o difíciles de recorrer, o en extensiones más grandes, que pueden requerir mucho tiempo.

110. La experiencia de la industria nuclear en el tratamiento de los materiales contaminados está promoviendo los esfuerzos en otros sectores que trabajan con materiales radiactivos naturales. Por ejemplo, la clausura de plataformas de extracción de petróleo y gas es una novedad importante en el ámbito de las actividades industriales relacionadas con esos materiales. Hay unas 1885 instalaciones de producción activas en la plataforma continental externa de los Estados Unidos de América, y más del 60 % de ellas superan los 25 años de antigüedad. Se estima que entre 2016 y 2021 se habrán clausurado en el mundo alrededor de 600 instalaciones marinas.

C.3. Gestión de desechos radiactivos

Situación

111. Se siguieron haciendo progresos importantes en el desarrollo de las instalaciones de disposición final geológica profunda necesarias para los desechos de actividad alta y el combustible gastado declarado como desecho. Entre otras cosas, mejoraron el conocimiento y la planificación temprana de los recursos requeridos, como el diseño y la aplicación de enfoques de selección de emplazamientos respaldados por los adelantos científicos y técnicos, la interacción con las partes interesadas y el suministro sostenido de esos recursos.

112. Los Emiratos Árabes Unidos crearon un fondo fiduciario destinado a atender las futuras responsabilidades de gestión de desechos, convirtiéndose así en el primer país que establece este tipo de disposiciones financieras antes de conectar a la red su primera central nuclear.

113. El Gobierno de Australia anunció el establecimiento de la Agencia Australiana de Desechos Radiactivos (ARWA), el siguiente paso importante en el desarrollo de la capacidad de gestión de desechos radiactivos del país. La ARWA trabajará con partes interesadas como los organismos industriales, comunitarios y gubernamentales y otras partes interesadas para encontrar la mejor forma de gestionar los desechos radiactivos. La Comisión de Legislación Económica del Senado de Australia recomendó que se enviara al Parlamento el proyecto de ley nacional sobre la reforma de la gestión de desechos radiactivos (especificación del emplazamiento, fondo comunitario y otras medidas), de 2020. La ley alude específicamente a Napandee, en Australia Meridional, como emplazamiento para una futura instalación de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia.

114. El Organismo Nacional de Desechos Radiactivos y Materiales Fisionables Enriquecidos de Bélgica llevó a cabo una consulta pública sobre una propuesta de plan nacional para la disposición final de desechos radiactivos de actividad alta y/o de período largo, que recomienda la disposición final geológica.

115. La Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear de Finlandia comunicó a las autoridades de los países que han suministrado uranio a centrales nucleares finlandesas que el país tiene previsto iniciar la disposición final del combustible nuclear gastado a mediados de la década de 2020. Dado que después de la disposición final no es posible realizar las inspecciones normales de los materiales nucleares, los procedimientos relacionados con esas inspecciones deben especificarse antes del inicio de la disposición final. Está previsto que el proceso de disposición final en la instalación de Onkalo (Finlandia), que se está construyendo a una profundidad de más de 400 metros por debajo del nivel del suelo, se inicie en 2024 (figura C-4). Francia y Suecia están inmersos en el proceso de concesión de la licencia para sus respectivos centros de disposición final geológica profunda en emplazamientos determinados. Varios países más, entre ellos los Estados Unidos de América, el Japón, el Reino Unido y Suiza, están realizando avances en sus proyectos relacionados con la disposición final geológica profunda.



Fig. C-4. Está previsto que el proceso de disposición final en la instalación de Onkalo (Finlandia) se inicie en 2024. El Director General del OIEA, Sr. Rafael Mariano Grossi, visitó Onkalo en noviembre de 2020. (Fotografía: TVO/Tapani Karjanlathi)

116. En el Reino Unido, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares (NDA) publicó un proyecto de estrategia para la gestión de los desechos radiactivos, la clausura y la rehabilitación ambiental en los antiguos emplazamientos. En consultas públicas que duraron 12 semanas, se invitó a todos los interesados a que presentaran sus observaciones, preguntas y retroinformación sobre el proyecto. La NDA anunció también la creación de un grupo de trabajo en Copeland (Cumbria) para examinar las novedades y oportunidades referentes a las instalaciones de disposición final geológica con las comunidades locales, como primer paso en un proceso de selección del emplazamiento de carácter plurianual y basado en el consentimiento. Además, en el emplazamiento de Winfrith de Tradebe Inutec comenzó la construcción de una instalación flexible para el tratamiento de desechos de actividad baja y de desechos de actividad entre baja e intermedia.

117. La Cooperativa Nacional para la Disposición Final de Desechos Radiactivos (Nagra) de Suiza recomendó la construcción de una planta de encapsulamiento de combustible gastado ya sea en el futuro repositorio nacional del país o en la Instalación de Almacenamiento Provisional de Würenlingen (ZWILAG) (figura C-5).



*Fig. C-5. Sala de almacenamiento de cofres de ZWILAG, en Suiza, utilizada para almacenar los desechos vitrificados de actividad alta de las plantas de reprocesamiento y los elementos combustibles gastados de las centrales nucleares suizas.
(Fotografía: ZWILAG)*

118. En los Estados Unidos de América, el Departamento de Energía aprobó el inicio de las operaciones de una instalación de procesamiento de desechos de sales en el emplazamiento de Savannah River, para el procesamiento de desechos líquidos de actividad alta almacenados en tanques.

119. En el primer paso de su proceso nacional de selección de un emplazamiento, Alemania publicó una lista de las zonas posiblemente adecuadas para un emplazamiento de disposición final de desechos de actividad alta. En la lista y en el proceso de estudio técnico, realizado por la Empresa Federal de Disposición Final de Desechos Radiactivos, se identificaron 90 zonas, correspondientes al 54 % de la superficie del país, que podrían ser adecuadas desde el punto de vista geológico, según los criterios de selección del emplazamiento y el enfoque científico prescritos en una ley alemana de 2017.

120. La Organización de Gestión de los Desechos Nucleares del Japón inició un estudio de la documentación en dos municipalidades de Hokkaido, Suttu y Kamoenai, para determinar si existe en ellas un lugar que pueda ser adecuado para un repositorio geológico profundo, como primer paso en el proceso de selección del emplazamiento de una instalación de ese tipo. Suttu decidió presentarse a este estudio, mientras que Kamoenai aceptó la propuesta del Gobierno del Japón para presentarse al estudio.

121. La Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares del Canadá consiguió algo más de 600 ha de tierras para realizar sus estudios en el municipio de South Bruce, en Ontario, uno de los dos candidatos posibles en su proceso de selección del emplazamiento para un repositorio geológico profundo del combustible nuclear gastado del país. El Gobierno federal también puso en marcha un proceso de consultas inclusivo para modernizar la política de desechos radiactivos del Canadá.

Tendencias

122. La cooperación internacional en la labor de investigación, desarrollo y demostración (ID&D) se ha centrado en medida creciente en temas relacionados con la gestión de los desechos radiactivos. La obligación de cumplir con la Directiva marco sobre los residuos ha dado lugar a avances en un número importante de países de la Unión Europea.

123. La Plataforma Tecnológica para la Disposición Final Geológica de Desechos Radiactivos, un consorcio autofinanciado de organizaciones de gestión de desechos radiactivos que cooperan en temas de ID&D de interés común, publicó la versión actualizada de su Programa Estratégico de Investigaciones,

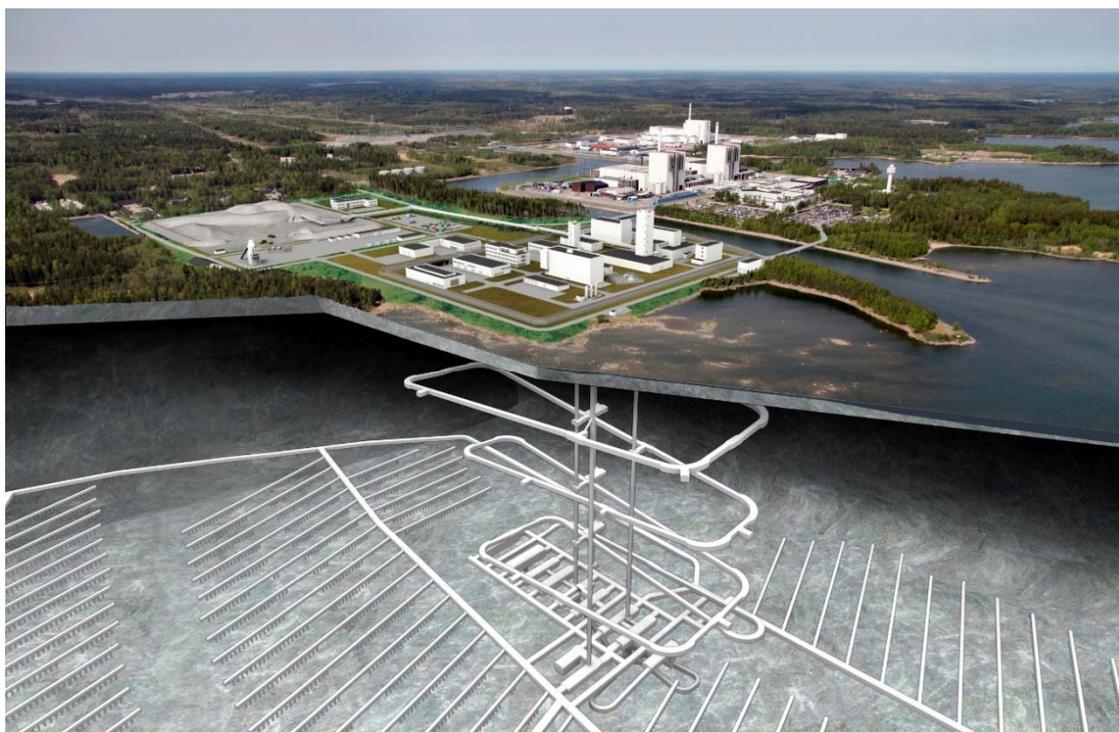
que se centra en la eficiencia y la industrialización de la creación de repositorios geológicos profundos en el futuro, así como en el desarrollo de nuevos conceptos viables para los inventarios más pequeños.

124. El Programa Conjunto Europeo de Gestión de Desechos Radiactivos (EURAD) presentó su amplia hoja de ruta a los usuarios finales interesados. La hoja de ruta ofrece un enfoque estructurado para avanzar hacia las soluciones de disposición final en la gestión de los desechos radiactivos, que comprende análisis de las deficiencias y nuevas necesidades de ID&D, estudios estratégicos centrados particularmente en la gestión de inventarios pequeños, y la gestión del conocimiento, y que destaca la importancia de la capacitación y la transferencia de conocimientos.

125. La Unión Europea puso en marcha el proyecto PREDIS (Pre-Disposal Management of Radioactive Waste), que se centra en la ID&D necesaria para el tratamiento y acondicionamiento previos a la disposición final de las corrientes de desechos radiactivos distintas del combustible nuclear y de los desechos radiactivos de actividad alta.

126. El Grupo de Trabajo de la Organización Europea de Desarrollo de Repositorios (ERDO) puso en marcha un proyecto de cooperación en que participan Croacia, Dinamarca, Eslovenia, Noruega y los Países Bajos para coordinar los esfuerzos destinados a evaluar la viabilidad de la disposición final en pozos barrenados de los inventarios de desechos de actividad alta.

127. El creciente número de éxitos en la gestión de desechos es una tendencia prometedora. En Suecia, el concejo municipal de Östhammar votó a favor del repositorio planificado para el combustible nuclear gastado en Forsmark (figura C-6), que será construido por la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB). La autorización final del proyecto está en manos del Gobierno de Suecia.



*Fig. C-6. Representación artística de la instalación de disposición final subterránea en Forsmark.
(Fuente: SKB)*

128. En Francia se concedió la licencia de explotación a una instalación de almacenamiento y acondicionamiento de desechos activados, ICEDA, lo que permitirá a Électricité de France acondicionar y almacenar los desechos radiactivos en preparación para su futura disposición final en el amplio conjunto de soluciones en que está trabajando el país.

129. Unos 42 Estados Miembros designaron un coordinador nacional para el Sistema de Información sobre Combustible Gastado y Desechos Radiactivos, y 83 Estados Miembros eran Partes Contratantes en la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos al final de 2020.

D. Reactores de investigación y aceleradores de partículas

D.1. Reactores de investigación

Situación

130. Durante la pandemia de COVID-19, los reactores de investigación que producen radioisótopos de uso médico para el suministro mundial fueron declarados proveedores de servicios esenciales a fin de reducir al mínimo el efecto de las restricciones relacionadas con la pandemia. Todas las organizaciones que explotan reactores introdujeron medidas proactivas para garantizar la seguridad de las instalaciones y del personal durante la pandemia. Algunas universidades e instituciones de investigación que utilizan reactores de investigación para la docencia, la capacitación y la investigación cerraron temporalmente sus instalaciones y las mantuvieron en un estado de parada segura. El transporte de radioisótopos se volvió difícil en medio de las restricciones impuestas a raíz de la COVID-19, como quedó demostrado en la encuesta del Organismo entre los principales productores de radioisótopos médicos generados mediante reactores, que evaluó el impacto de la pandemia en la continuidad de la cadena de suministro. La Secretaría organizó una reunión de información técnica informal para los Estados Miembros sobre la producción de radioisótopos en reactores de investigación, así como sobre el uso de ciclotrones médicos, el transporte y la producción de radiofármacos y la demanda de estos fármacos durante la pandemia de COVID-19.

131. Hay 11 reactores de investigación nuevos en construcción en 8 países: Arabia Saudita, Argentina, Brasil, Federación de Rusia, Francia, India, República de Corea y Ucrania (un sistema accionado por acelerador). Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para la construcción de nuevos reactores, entre ellos Bangladesh, Belarús, Bélgica, Bolivia, China, los Estados Unidos de América, Nigeria, los Países Bajos, Tailandia, Tayikistán (terminación del reactor Argus-FTI), Viet Nam y Zambia. Otros, como Azerbaiyán, Etiopía, Filipinas, Ghana, Kenya, Malasia, Mongolia, Myanmar, el Níger, la República Unida de Tanzania, el Senegal, Sudáfrica, el Sudán y Túnez, están estudiando la posibilidad de construir nuevas instalaciones.

Proyectos de nuevos reactores de investigación

11 reactores de investigación (RI)
nuevos en construcción en **8** países



planes oficiales para construir nuevos RI



están estudiando la construcción de RI

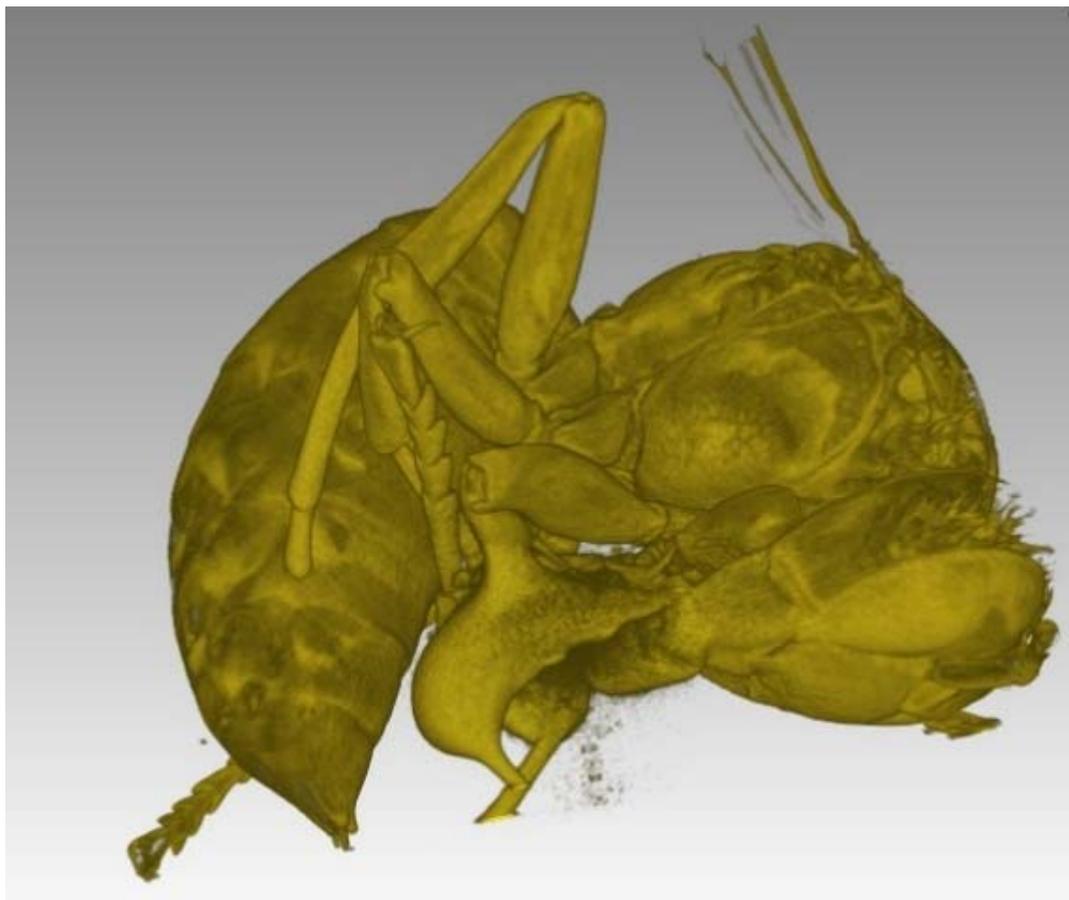


132. Los reactores de investigación siguieron siendo indispensables para el suministro de radioisótopos a la medicina y la industria, la provisión de haces de neutrones para el estudio de materiales y la realización de análisis no destructivos, y la prestación de servicios analíticos y de irradiación a los sectores público y privado, así como de servicios para el análisis del patrimonio cultural y los estudios ambientales. Estos reactores hacen una contribución estratégica a la enseñanza y la capacitación (figura D-1). Sus aplicaciones más frecuentes se enumeran en el cuadro D-1 del anexo.



Fig. D-1. Los reactores de investigación tienen usos en una gran variedad de campos, desde la enseñanza y la capacitación hasta la industria, la medicina y otros. (Fotografía: OIEA)

133. Aunque en la imagenología neutrónica digital se utilizan normalmente fuentes de neutrones de alta intensidad, en sus versiones estándar, como la radiografía y la tomografía computarizada (TC), pueden emplearse ahora también fuentes de neutrones de intensidad más baja, con flujos intranucleares del orden de $10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Esto se ha vuelto posible gracias a los avances recientes en las cámaras astronómicas, que han conducido al desarrollo de sistemas de imagenología neutrónica digital relativamente simples y de bajo costo. La calidad de la imagen es competitiva en las aplicaciones estándar, y suficiente en alrededor del 80 % de todas las aplicaciones de imagenología (figura D-2). Este adelanto permitirá introducir en la imagenología nuclear el uso de fuentes neutrónicas de intensidad más baja, obtenidas ya sea con reactores de investigación o con aceleradores. En 2020, el Organismo lanzó un curso electrónico sobre imagenología neutrónica que incluye esta nueva posibilidad.



*Fig. D-2. Imagen de TC tridimensional de alta resolución de un avispon.
(Fotografía: Burkhard Schillinger, Technische Universität München, Alemania)*

134. Hasta el momento, 107 reactores de investigación y 4 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al empleo de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o están en régimen de parada confirmada. En 2020, Kazajistán eliminó su último UME no irradiado degradándolo a un nivel de enriquecimiento inferior al 20 %, y prosiguió los preparativos para la retirada y disposición del combustible de UME irradiado. En total, los programas internacionales han finalizado la retirada o disposición confirmada de aproximadamente 6815 kg de UME de origen chino, ruso y estadounidense y de otras procedencias.

135. Prosiguieron los esfuerzos internacionales para convertir los productores de isótopos de uso médico al empleo de blancos de UPE, en lugar de UME. El Instituto Nacional de Radioelementos de Bélgica inició el suministro comercial de molibdeno 99 producido con UPE, sumándose así a otros líderes mundiales en la producción de este radioisótopo de alta demanda en la medicina, con planes de aumentar aún más su producción de Mo 99 sin utilizar UME y ultimar la conversión dentro de 2022.

Tendencias

136. El interés mundial por los reactores de investigación siguió creciendo. Muchos países aprovecharon las oportunidades de acceso a los reactores de ese tipo ya existentes, por ejemplo a través de los cursos regionales con reactores de investigación impartidos por el Organismo para el fomento de la capacidad y del plan de los Centros de Excelencia Internacionales basados en Reactores de Investigación (ICERR) designados por el OIEA. En 2020 se sumó a esos centros el Instituto de Investigaciones Nucleares de Pitesti, en Rumania, y la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia fue designada por otro período de cinco años. El uso de las herramientas de aprendizaje electrónico y fomento de la capacidad, como el Reactor-Laboratorio por Internet del Organismo, cobró más importancia, con un mayor interés y apoyo por parte tanto de la Secretaría como de los Estados Miembros.

137. Más del 60 % de los reactores de investigación en funcionamiento en el mundo han superado los 40 años de servicio. El ciclo de vida útil puede llegar a 60 años o más, pero para ello es de la máxima importancia que se inicien a tiempo programas adecuados de gestión del envejecimiento, renovación y modernización. En vista de la tendencia general a la reducción de la financiación para estas instalaciones y de la escasa planificación de la sucesión, la aplicación de buenos sistemas de gestión y de programas de explotación, mantenimiento y gestión de la vida útil adecuados es fundamental para que estos reactores puedan cumplir sus misiones de manera rentable.

D.2. Aceleradores de partículas e instrumentación

Situación

138. En el último decenio, muchos Estados Miembros han manifestado un interés creciente por el desarrollo de fuentes compactas de neutrones basadas en un acelerador, como alternativa al parque de reactores de investigación de potencia baja y media, que va envejeciendo. Hay más de 50 proyectos de ese tipo en curso en unos 20 países del mundo. Estas fuentes utilizan muchas clases de aceleradores para ofrecer flujos de neutrones de entre 10^{11} y 10^{13} $\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ para una variedad de aplicaciones. En 2020, el Centro Jülich de Helmholtz, en Alemania, finalizó el diseño conceptual de una fuente compacta de neutrones basada en un acelerador lineal (linac) de protones de alta corriente, que cumpliría la función de instalación nacional de dispersión neutrónica. Esta infraestructura relativamente barata y ligera que requiere una fuente compacta de neutrones podría atender las necesidades de una serie de instrumentos analíticos, y sería adecuada para universidades e industrias privadas, aumentando así la disponibilidad y aplicabilidad de las técnicas basadas en haces de neutrones.

139. En la figura D-3 se ilustra otro ejemplo de un nuevo acelerador lineal superconductor de alta intensidad y sus salas experimentales. Esta instalación, denominada SPIRAL2, que está siendo puesta en servicio actualmente en el centro de investigación del Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados (GANIL) de Francia, estudiará núcleos pesados de período corto y aplicaciones de la fisión y la fusión, así como la ciencia de los materiales, con haces de neutrones y de partículas cargadas. Además, el uso de haces de iones ligeros del acelerador lineal, por ejemplo de partículas α y de litio 6 o litio 7 lanzados contra blancos de plomo y bismuto, permitirá investigar métodos más eficientes de producción de ciertos radioisótopos para el tratamiento del cáncer.

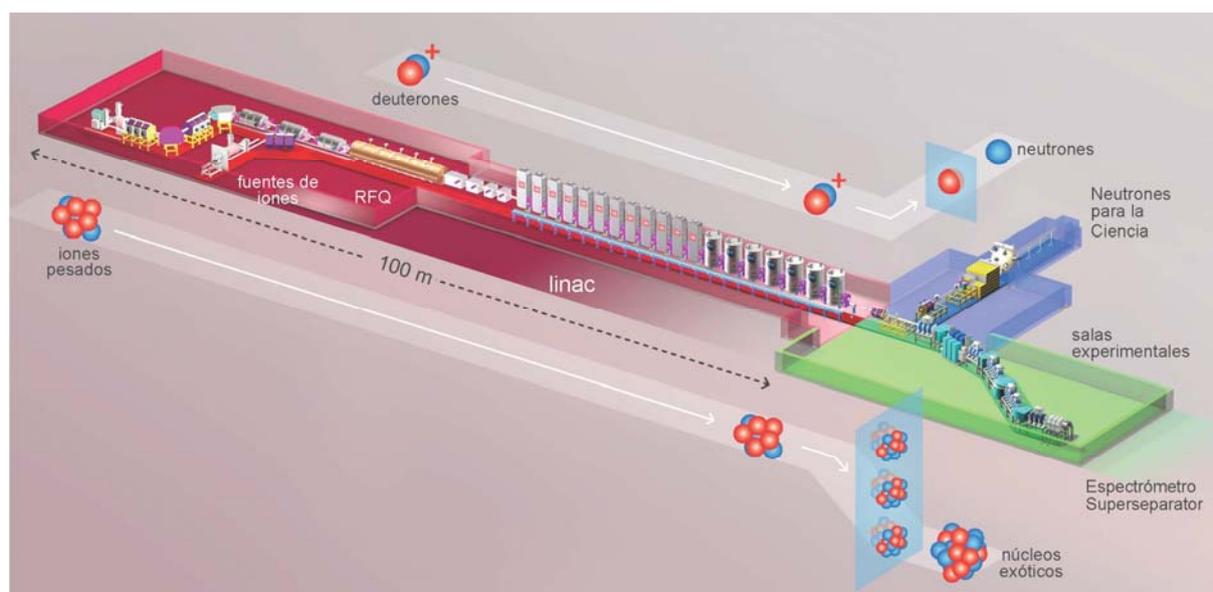


Fig. D-3. Instalación SPIRAL2, con su acelerador lineal superconductor de alta potencia (200 kW). La línea de haces de Neutrones para la Ciencia ofrecerá haces neutrónicos de intensidades sin precedentes, en intervalos de energía de entre 1 y 40 MeV, superiores en hasta dos órdenes de magnitud a los de otras instalaciones similares. (Imagen: Alahari Navin, GANIL, Francia)

140. En la figura D-4 se ilustra otro proyecto, basado en un acelerador lineal de protones/deuterones superconductor y de alta potencia (200 kW), que está entrando en la fase 2, correspondiente a un aumento de la energía de 5 a 40 MeV, con una intensidad prevista de la fuente de neutrones de hasta 10^{15} n/s, que se utilizará para diversas aplicaciones, incluida la investigación básica con neutrones.



*Fig. D-4. Acelerador lineal de protones/deuterones superconductor y de alta potencia (200 kW) (izquierda), combinado con tecnología innovadora de blancos de litio líquido para la producción de neutrones (derecha).
(Imagen: Dan Berkowitz, Centro de Investigaciones Nucleares de Soreq, Israel)*

141. Finlandia, a través del Hospital Universitario de Helsinki, está llegando al final de la fase de puesta en servicio de una fuente de neutrones accionada por un acelerador compacto de protones (un acelerador electrostático de 2,6 MV diseñado para operar a 30 mA) en el entorno hospitalario, con el objetivo principal de iniciar los ensayos de la terapia por captura neutrónica en boro, para luego pasar al tratamiento de pacientes. Los neutrones se producen en un blanco de litio en rotación.

142. En el campo de los sensores de radiaciones para la aplicación en vehículos aéreos no tripulados hubo un avance notable. Los simples contadores Geiger-Müller están cediendo el paso rápidamente a sistemas de espectrometría gamma basados en detectores de centelleo, como los de bromuro de lantano (III) (LaBr_3) o de bromuro de cerio (III) (CeBr_3). Un éxito reciente en la detección de la radiación para la cartografía radiológica con drones fue la aparición en el comercio de detectores de centelleo basados en el uso de fotomultiplicadores de silicio y mejorados con un generador y preamplificador de corrección integrada de los efectos de la temperatura. Esto permite el procesamiento digital rápido de las señales del detector, y procesa todos los datos medidos en tiempo real, con una georreferenciación exacta basada en los sistemas mundiales de navegación por satélites (GNSS), para producir una cartografía de alta resolución (figura D-5) de los niveles de radiación e identificar los radioisótopos.

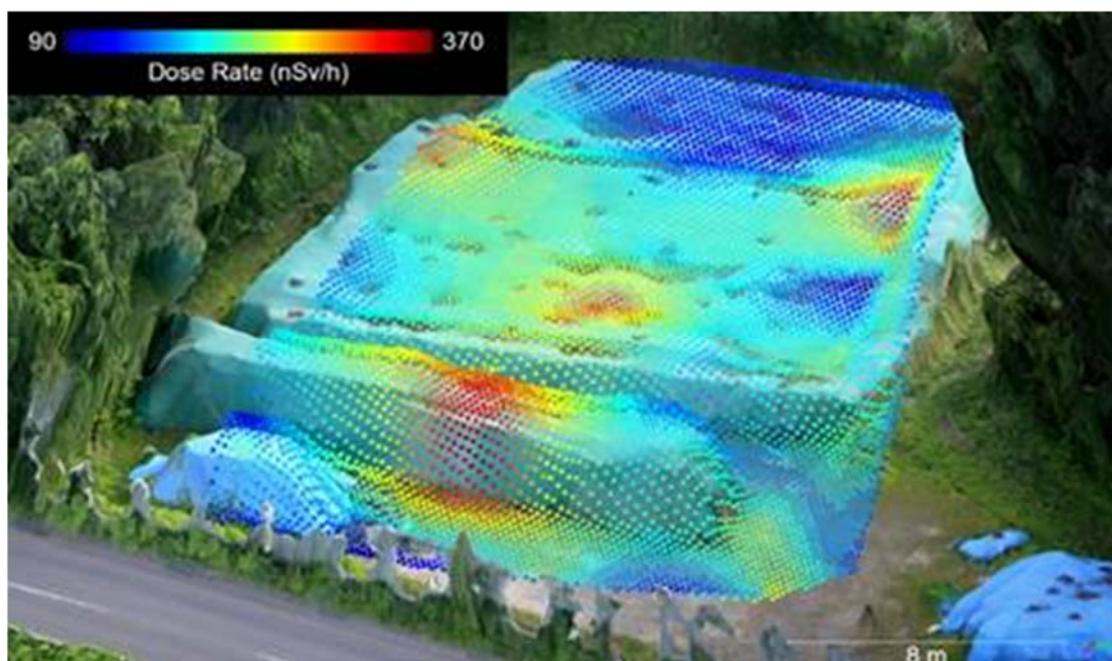


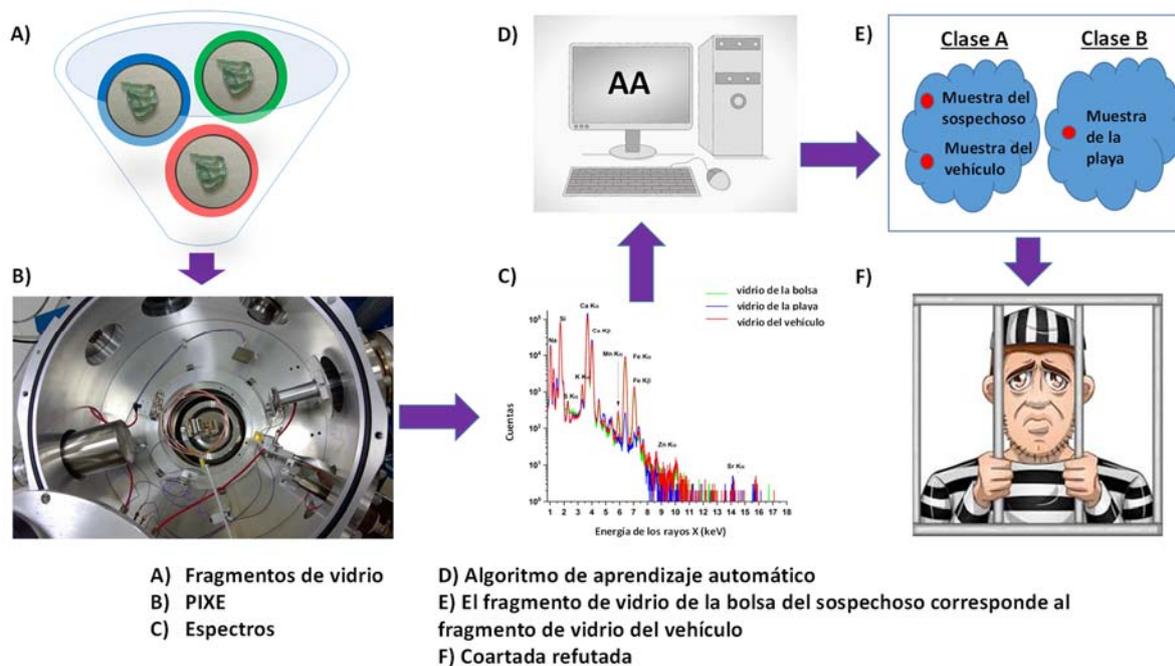
Fig. D-5. Mapa radiológico de alta resolución (el rojo indica tasas de dosis elevadas) combinado con fotogrametría aérea tridimensional. El mapa fue obtenido con un único vehículo aéreo no tripulado, en dos vuelos consecutivos. (Imagen: OIEA)

Tendencias

143. Los adelantos en el ámbito de los sistemas de monitorización radiológica basados en plataformas de vehículos aéreos no tripulados/drones se están acelerando, gracias principalmente a la expansión de la tecnología de esos vehículos y al diseño de detectores de radiación miniaturizados, combinados con los GNSS y con algoritmos de procesamiento rápido de datos. Ante la creciente demanda de flexibilidad y operatividad de los sistemas móviles de monitorización, se están priorizando las soluciones basadas en vehículos aéreos no tripulados para las zonas peligrosas o para aquellas a las que no es posible el acceso humano con fines de monitorización radiológica, búsqueda de fuentes de radiación o respuesta rápida a una emergencia en caso de incidente o accidente radiológico. Los vehículos aéreos no tripulados se están volviendo más robustos y duraderos, en el sentido de que resisten mejor a las condiciones de trabajo imperantes, como la temperatura y la humedad, y al agua y el polvo. También está aumentando su autonomía, gracias a las mejores opciones de tiempo de vuelo prolongado, captación de señales ambientales, cartografía avanzada y algoritmos de procesamiento de datos mejorados mediante el uso de la inteligencia artificial.

144. Los enfoques basados en el aprendizaje automático ofrecen grandes posibilidades de fomentar la ciencia y las aplicaciones nucleares en varios ámbitos, como la estadificación del cáncer en la medicina nuclear y el tratamiento oncológico por radioterapia, acelerar los progresos en la investigación de la fusión nuclear, y ayudar a proteger el medio ambiente, especialmente los recursos hídricos mundiales, contra la sobreexplotación y la contaminación. Varios ejemplos muy recientes han demostrado la capacidad de la inteligencia forense de ofrecer soluciones tecnológicas para combatir la delincuencia en diferentes países. El análisis de indicios es una parte fundamental de las investigaciones forenses. Los algoritmos de aprendizaje automático están teniendo un uso creciente en la ciencia forense para afrontar retos que antes eran inabordables. Estos métodos de aprendizaje pueden emplearse también para identificar patrones y clasificar distintas muestras, constituyendo así una valiosa herramienta para realizar ese trabajo.

145. Por ejemplo, en el análisis forense del vidrio, las muestras se comparan normalmente utilizando sus concentraciones elementales. Si son suficientemente grandes, los fragmentos de vidrios rotos permiten a los peritos forenses determinar la forma originaria y la procedencia del objeto. Sin embargo, para los fragmentos pequeños esta es una tarea imposible con los métodos tradicionales. En tales casos pueden utilizarse técnicas analíticas nucleares, como la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE) y el análisis por activación neutrónica, combinadas con herramientas de aprendizaje automático y bases de datos específicas (inventarios) de la fabricación de vidrios, para relacionar al sospechoso con el lugar del delito (figura D-6).



A) Fragmentos de vidrio
B) PIXE
C) Espectros
D) Algoritmo de aprendizaje automático
E) El fragmento de vidrio de la bolsa del sospechoso corresponde al fragmento de vidrio del vehículo
F) Coartada refutada

Fig. D-6. Flujo de trabajo basado en el aprendizaje automático.

En primer lugar, se recogen muestras en el lugar del delito (A), que se someten luego a un análisis elemental por PIXE (B). Las mediciones resultantes se analizan (C) y se introducen en modelos de aprendizaje automático (D) que producen una clasificación de las muestras (E). Con este conocimiento, los detectives de la policía pueden confirmar o invalidar una coartada. En este caso de atropello con fuga, (E) demostró que el fragmento encontrado en el sospechoso y el fragmento tomado del vehículo causante del atropello eran de la misma clase, mientras que el fragmento de la playa era de una clase diferente, indicando así una probable relación entre el sospechoso y el vehículo en cuestión.

(Imagen: Universidad Bar-Ilan y su Instituto de Nanotecnología y Materiales Avanzados, Israel)

E. Alimentación y agricultura

E.1. Métodos de marcado isotópico y técnicas nucleares innovadoras para la medición de residuos en los alimentos — Respuestas a las necesidades de salud pública y del comercio

Situación

146. En la producción de alimentos, se utilizan en todo el mundo productos químicos tales como medicamentos veterinarios y plaguicidas, incluidos los herbicidas. Sin embargo, los residuos de los productos químicos presentes en los alimentos plantean preocupaciones de salud pública y problemas comerciales y, en consecuencia, deben regularse mediante patrones conocidos como límites máximos de residuos (LMR), que establecen las concentraciones máximas permitidas en la superficie o dentro de los alimentos. Los LMR influyen en el comercio, y el Acuerdo sobre la Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias de la Organización Mundial del Comercio remite a los LMR establecidos por la Comisión del Codex Alimentarius. La armonización de los LMR tiene ventajas para los Gobiernos, los agricultores, los comerciantes y el público. La ausencia de estos límites causa una perturbación considerable del comercio⁶. Varios de los compuestos utilizados en la producción de alimentos aún no tienen LMR.

⁶ “Coalition for an Enhanced Codex”; disponible en: <https://agrifood.net/iafn-codex-coalition>.

147. Para determinar los LMR de los medicamentos veterinarios y colmar así las lagunas existentes en las normas alimentarias, se requiere información obtenida mediante estudios del metabolismo animal (la disminución de los residuos) que utilizan materiales radiomarcados. Las técnicas nucleares, entre otras, pueden ofrecer la rastreabilidad y las mediciones exactas requeridas para los estudios del metabolismo.

148. En estos estudios se utilizan medicamentos o compuestos conexos radiomarcados con isótopos tales como el carbono 14, el azufre 35, el fósforo 32 y el hidrógeno 3, que se administran a los animales productores de alimentos en cuestión para rastrear su distribución y descomposición en residuos y metabolitos clave, especialmente en los tejidos comestibles (como el músculo, el hígado, los riñones y la grasa). Los estudios con marcado isotópico, considerados el 'patrón oro' de los estudios del metabolismo, se emplean en los sectores agroquímico y farmacéutico humano y veterinario, donde generan datos que facilitan la evaluación de la inocuidad, protegiendo así, en última instancia, al consumidor. Determinar los niveles de radiactividad entraña actualmente la combustión y solubilización de los tejidos animales, lo que requiere técnicas de medición exactas y fiables para confirmar el tipo de residuos de que se trata y su concentración.

Tendencias

149. El uso de sustancias químicas en la producción de alimentos está cambiando en todo el mundo. Cada año, se desarrollan medicamentos/sustancias químicas para hacer frente a nuevos desafíos. Por consiguiente, la demanda de reglamentación de esas sustancias, que requiere estudios con marcado isotópico para los que no existen técnicas alternativas, ha venido aumentando. Los compuestos radiomarcados desempeñan un papel crucial, ya que permiten rastrear y estudiar todos los residuos químicos en los distintos tejidos.

150. Para analizar y caracterizar los compuestos radiomarcados de los tejidos animales observados en los estudios del metabolismo se utilizan herramientas y técnicas tales como la resonancia magnética nuclear con hidrógeno 3 y carbono 13, el recuento por centelleo líquido, y el radioinmunoanálisis y el análisis de radiorreceptores. Además, la generación de datos exactos requiere el uso de técnicas/métodos de análisis nucleares innovadores y eficaces en relación con el costo, como los ensayos con radiorreceptores concurrentes, entre otros, que se apoyen en la espectrometría de masas de alta resolución. También están apareciendo nuevas tecnologías de autorradiografía, como herramientas de investigación adicionales, que facilitan la cuantificación y visualización de la radiactividad en tejidos y órganos intactos.

151. Estudios recientes indican que los medicamentos veterinarios en los animales productores de alimentos de consumo humano pueden dejar también algunos residuos que no son fáciles de extraer de los tejidos y, por lo tanto, no se detectan en los análisis de laboratorio de esos alimentos. Estos residuos pueden plantear problemas toxicológicos en los consumidores. Por lo tanto, es preciso desarrollar métodos analíticos innovadores que revelen esos peligros 'ocultos'.

152. Otra cuestión relacionada con la inocuidad de los alimentos que se está planteando en algunas regiones es la necesidad de datos científicos que faciliten el establecimiento de normas y LMR para los alimentos de importancia local y regional, como las vísceras (los órganos internos de los animales). Estos tipos de alimentos serán objeto de nuevos estudios del metabolismo animal con marcado isotópico. Por ahora, los estudios de esta clase realizados en animales se centran en un único medicamento y/o producto químico, aun cuando en la producción de alimentos se empleen varios de ellos combinados. Por consiguiente, la información generada en esos estudios es incompleta. En adelante, los estudios con marcado isotópico utilizarán combinaciones de productos químicos.

153. Un ámbito conexo que está cobrando interés y al que los estudios con marcado isotópico pueden hacer una contribución es la respuesta a la demanda mundial de que los gestores del riesgo armonicen las normas y los LMR para los compuestos utilizados en la producción pecuaria y agrícola, poniendo fin a la práctica actual de establecer normas aparte para los productos animales y vegetales, que no ayuda a hacerse una idea clara de los niveles de peligro de los alimentos consumidos.

154. Los países en desarrollo están mostrando un interés creciente en participar en estudios de animales con marcado isotópico y producir datos científicos para el establecimiento de normas, dadas las repercusiones de la ausencia de LMR en las economías de estos países y las necesidades de los consumidores. A este respecto, el Organismo inició recientemente un nuevo proyecto coordinado de investigación (PCI) sobre los residuos de los fármacos veterinarios y los productos conexos utilizados en la producción pecuaria, que despertó el interés de varios Estados Miembros. La investigación prevista comprende varias especies animales, como el ganado vacuno y equino, los peces, las cabras y las ovejas (figura E-1), y podría hacerse extensiva a ciertos cultivos, especialmente en relación con la contaminación de los piensos. Se espera que este PCI contribuya a reducir la dependencia de los países en desarrollo de instalaciones e instituciones externas para realizar estudios con marcado isotópico y generar datos que permitan evaluar el riesgo y fijar LMR con miras a facilitar el comercio y proteger a los consumidores.



Fig. E-1. Algunos de los animales en que se centrarán los estudios de los residuos con marcado isotópico en el Sudán. (Fotografía: OIEA)

F. Salud humana

F.1. Avances en la microdosimetría y la nanodosimetría

Situación

155. La microdosimetría es el subcampo de la física de las radiaciones que estudia sistemáticamente la distribución espacial de la energía absorbida en las estructuras microscópicas de la materia irradiada. Nacida hace más de 60 años, la microdosimetría sigue despertando gran interés científico en la medicina radiológica, la protección radiológica, la radiobiología y otras esferas, como la investigación espacial.

156. En el ámbito de la medicina radiológica, la microdosimetría reviste particular interés para la terapia con haces iónicos, una técnica avanzada que, en lugar de la irradiación convencional con fotones, utiliza haces de protones y de carbono para tratar tumores, con un daño mínimo a los tejidos sanos. En esta aplicación, la medición estándar de la dosis absorbida no es suficiente para explicar los resultados de la radiación, ya que la eficacia radiobiológica varía a lo largo de la trayectoria de un haz iónico clínico en el cuerpo humano.

157. Por consiguiente, en la protección radiológica y en varias modalidades de la medicina radiológica se aplican factores de ponderación macroscópicos de la dosis absorbida, a fin de tener en cuenta la eficacia biológica de la calidad particular de la radiación (los números relativos de partículas según el tipo y la energía en los lugares de interés del material irradiado). Como ejemplos cabe mencionar los haces de protones y de iones, los neutrones y los rayos X de kilovoltaje utilizados en la braquiterapia. La microdosimetría y la nanodosimetría (conocida también como microdosimetría estructural) proporcionan cantidades de radiación que captan la influencia de la naturaleza de las interacciones y, por lo tanto, las propiedades de las diferentes cualidades de la radiación de las que depende su eficacia biológica.

158. La microdosimetría es un campo amplio e interdisciplinario, que abarca desde las simulaciones y la modelización hasta el desarrollo de detectores e instrumentos específicos, con aplicaciones clínicas y de otra índole.

159. Ningún microdosímetro es capaz por sí solo de caracterizar adecuadamente todas las diferentes radiaciones ionizantes, y los estudios recientes de todo el mundo se están centrando en detectores desarrollados para aplicaciones específicas. En el caso de las intensas corrientes de haces de iones utilizadas en las aplicaciones terapéuticas, el objetivo es reducir el detector a tamaños submilimétricos, mientras que en los ámbitos de la protección radiológica y las aplicaciones espaciales se están desarrollando microdosímetros de áreas grandes.

Tendencias

160. Hay varias cuestiones que deberán resolverse antes de que la microdosimetría pueda convertirse en la norma para la estimación de los efectos biológicos en los diferentes usos de las tecnologías de la radiación. Un hito fundamental es la normalización de los datos microdosimétricos, que incluye un estudio de la contribución relativa de distintos factores a la incertidumbre.

161. Un primer paso consiste en desarrollar metodologías y mecanismos comunes para la notificación de la microdosimetría. Es necesario realizar una labor de comparación de los microdosímetros de diferentes volúmenes sensibles, formas y materiales, a fin de obtener resultados unívocos y que no dependan del detector. Además, los datos microdosimétricos deberían investigarse con vistas a predecir los parámetros adoptados para los distintos usos de los detectores: la transferencia lineal de energía en la terapia con haces iónicos (figura F-1), la eficacia biológica relativa en la radiobiología y el factor de calidad en la protección radiológica.



*Fig. F-1. La planificación y administración de la terapia con haces iónicos es uno de los ámbitos en que la microdosimetría podría hacer una contribución valiosa. La figura muestra una sala de irradiación del centro de terapia con haces iónicos MedAustron en Wiener Neustadt (Austria), donde se administran tratamientos con haces de protones y de iones de carbono a pacientes con tumores. El brazo robótico montado en el techo sostiene la mesa del paciente y el anillo de adquisición de imágenes por rayos X permite la alineación del paciente.
(Fuente: MedAustron, Austria. Autor: Kästenbauer/Ettl)*

162. El Organismo puede desempeñar un papel estratégico en la provisión del entorno y los conocimientos especializados multidisciplinarios que se requieren en esta esfera. En la Reunión Técnica sobre Nuevas Tendencias y Avances en la Microdosimetría y sus Aplicaciones, organizada por el Organismo en octubre de 2020, se determinaron las direcciones de la investigación futura, que incluyeron temas importantes como los haces iónicos, aspectos de la protección radiológica, la modelización biológica y la nanodosimetría. Esas direcciones servirán de guía al Organismo en su labor conexas de desarrollo e investigación en los próximos ciclos del programa.

G. Radioisótopos y tecnología de la radiación

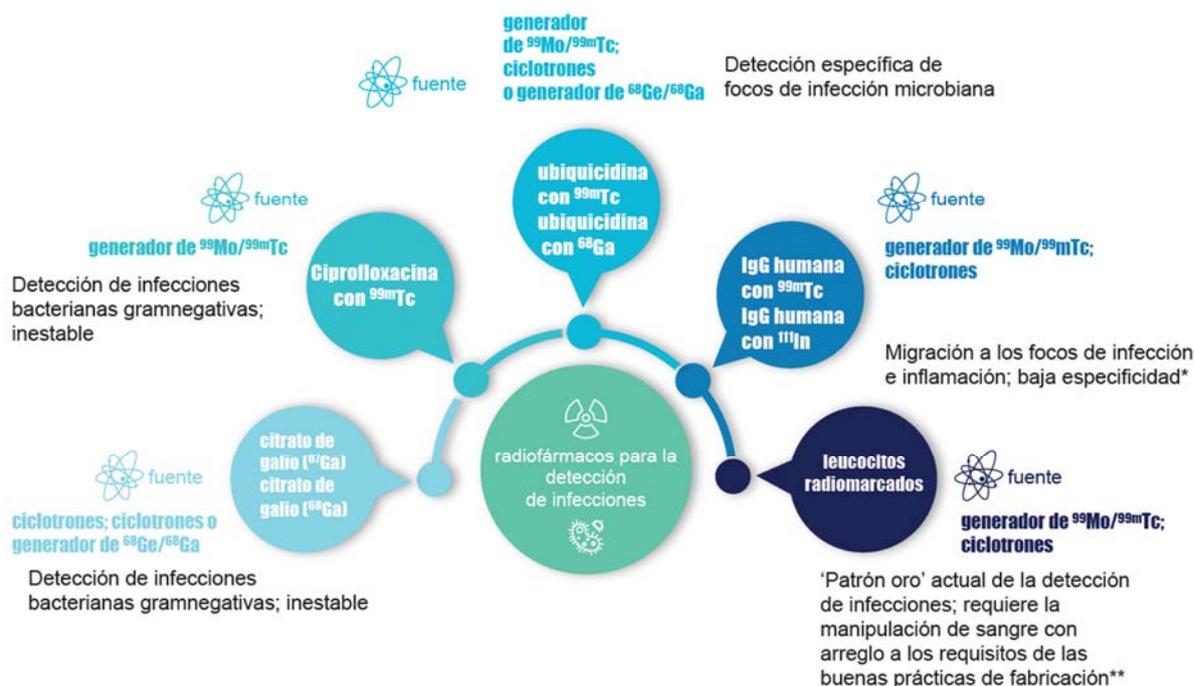
G.1. Papel de los radiofármacos en la detección, el diagnóstico y la gestión de las enfermedades infecciosas

Situación

163. Las enfermedades infecciosas son una amenaza para la población humana, como lo demuestra la actual pandemia de COVID-19. Mientras todas las disciplinas científicas centran sus esfuerzos en entender mejor esas enfermedades utilizando tecnologías avanzadas, el desarrollo de radiofármacos ha llegado a una etapa que está haciendo posible la visualización no invasiva de los procesos celulares y bioquímicos, allanando así el camino para el diagnóstico, y posiblemente el tratamiento, de las enfermedades infecciosas humanas con esos fármacos.

164. La detección y el tratamiento tempranos de las enfermedades infecciosas son factores importantes en el control y la reducción de la morbilidad y la mortalidad de los pacientes. La respuesta inmunitaria es un fenómeno complejo, y un radiofármaco ideal debería ser capaz de distinguir específicamente los organismos infecciosos vivos de los no patógenos y de otras infecciones e inflamaciones del cuerpo. El radiofármaco debería presentar una acumulación cuantitativa y una retención suficiente solo en los tejidos infectados, para un diagnóstico preciso y/o una evaluación exacta de la respuesta terapéutica.

165. Varios radiofármacos desempeñan un papel importante en la detección no invasiva de infecciones en la práctica clínica. Sin embargo, ninguno de ellos distingue claramente la causa específica de la infección, ni los diferentes tipos de infección.



* *Development of kits for ^{99m}Tc radiopharmaceuticals for infection imaging (IAEA-TECDOC-1414).*
Error! Hyperlink reference not valid. ** *Radiolabelled Autologous Cells: Methods and Standardization for Clinical Use (Colección de Salud Humana del OIEA N° 5).*

Tendencias

166. Ante la creciente complejidad de las infecciones, incluidas las infecciones víricas posiblemente mortales de los últimos decenios, como la causada por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), el síndrome respiratorio agudo grave, la gripe aviar, el ébola y la COVID-19, se están identificando varias moléculas prometedoras que podrán utilizarse para detectar y diagnosticar infecciones específicas en el cuerpo o en muestras humanas.

167. Durante más de 20 años, el OIEA, en colaboración con la FAO, ha impartido capacitación y equipado a expertos de todo el mundo para que utilicen tecnologías inmunológicas (p. ej.: el radioinmunoanálisis (RIA), el análisis de inmunoadsorción ligado a enzimas (ELISA)) y moleculares (la reacción en cadena de la polimerasa (PCR)) nucleares y de base nuclear. Estas tecnologías sensibles y específicas, así como sus aplicaciones, se han ido usando cada vez más para detectar de manera temprana y rápida, caracterizar, vigilar y controlar enfermedades animales y zoonóticas transfronterizas. Recientemente, estas técnicas se han empleado para el diagnóstico de enfermedades infecciosas que podrían dar lugar a pandemias, como la peste porcina africana, la fiebre aftosa, el ébola, el zika, la gripe aviar, el MERS, el SRAS y, recientemente, la COVID-19. Los laboratorios del Organismo en Seibersdorf proporcionaron servicios y asesoramiento especializados, procedimientos operacionales

normalizados (PON), capacitación relacionada con el equipo de protección personal (EPP), creación de capacidad de índole técnica y formación sobre el procedimiento para la realización de pruebas, así como el lote de apoyo contra la COVID-19, que contenía equipo, reactivos y material fungible, a más de 120 Estados Miembros.

168. Los anticuerpos monoclonales, que se pueden producir a gran escala en laboratorios especializados, han evolucionado desde su descubrimiento en 1973 y pueden ahora emplearse para nuevas terapias basadas en la biología macromolecular. Los anticuerpos monoclonales utilizados en el tratamiento de tumores pueden acoplarse a antígenos tumorales específicos y constituyen el vehículo para administrar radionucleidos a un foco tumoral particular. Esta nueva técnica surgió en el uso de anticuerpos monoclonales marcados con radioisótopos emisores de fotones, que, tras su inyección en el cuerpo humano, permiten el diagnóstico del cáncer. Esto es lo que se conoce como radioinmunoimagen, u obtención de imágenes con anticuerpos monoclonales.

169. En el paso siguiente, los científicos prepararon anticuerpos monoclonales marcados con radioisótopos emisores β , capaces de identificar las células tumorales y llegar a ellas, para luego bombardearlas con partículas β de alta energía a fin de destruir las células cancerosas. Este procedimiento se conoce como radioinmunoterapia (RIT).

170. Se ha descubierto que los microorganismos extraños tienen estructuras moleculares superficiales que pueden desencadenar la producción de anticuerpos monoclonales específicos de microorganismos en el huésped, lo que permite utilizar la radioinmunoimagen y la radioinmunoterapia para la detección de una variedad de enfermedades infecciosas, incluidas amenazas de origen micótico, vírico o bacteriano, y su posible aplicación con fines terapéuticos. Las bases de datos de los ensayos clínicos muestran al menos 88 estudios en ensayos clínicos en relación con el uso de anticuerpos monoclonales en pacientes con COVID-19. En los estudios preliminares también se explora el uso de la radioinmunoimagen para diagnosticar la COVID-19, sobre la base de antígenos específicos de la superficie del virus. En un ejemplo, se utiliza el anticuerpo recombinante contra la glicoproteína espicular S1 del-SARS-CoV-2 (CR3022), desarrollado a escala comercial primero para los ensayos *ex vivo*, como los ensayos de adsorción, que se considera ahora un agente que podría ser utilizado para el diagnóstico de la COVID-19 (figura G-1). Se ha conseguido marcar el anticuerpo monoclonal con yodo 131 para estudios de fijación a receptores y como prueba preliminar de viabilidad, y se propone su aplicación como versión radiomarcada terapéutica del CR3022.

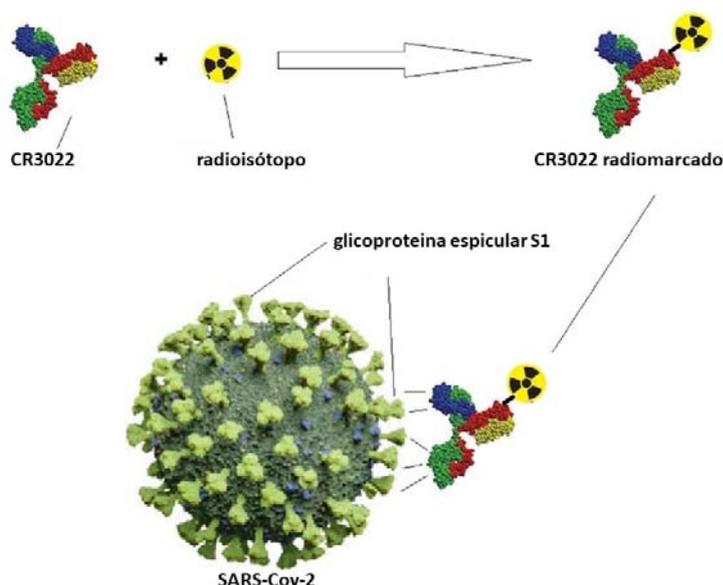


Fig. G-1. Esquema del posible desarrollo del anticuerpo monoclonal CR3022 radiomarcado terapéutico contra el coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2) con fines diagnósticos. (Fuente: OIEA)

171. Sin embargo, aún son muchas las preguntas que no tienen respuesta, y una de ellas se refiere a los efectos que las mutaciones del genoma del virus podrían tener en la eficacia del método.

172. En un estudio, el radiofármaco terapéutico Bi-213 anti-HIV-1 gp41 logró eliminar los leucocitos monomorfonucleares y los monocitos de la sangre periférica infectados por el VIH sin dañar la barrera hematoencefálica humana, lo que podría abrir camino a un tratamiento de las infecciones por el VIH.

173. Estos alentadores avances recientes en el ámbito de los radiofármacos innovadores preparados con anticuerpos monoclonales contra microorganismos específicos demuestran el potencial que ofrecen esos radiofármacos para el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades infecciosas, y el estudio de su uso es un objetivo pertinente y oportuno para todos los Estados Miembros.

H. Medio ambiente

H.1. Técnicas nucleares y de base nuclear para promover el conocimiento del carbono azul mundial y hacer frente a las repercusiones del cambio climático

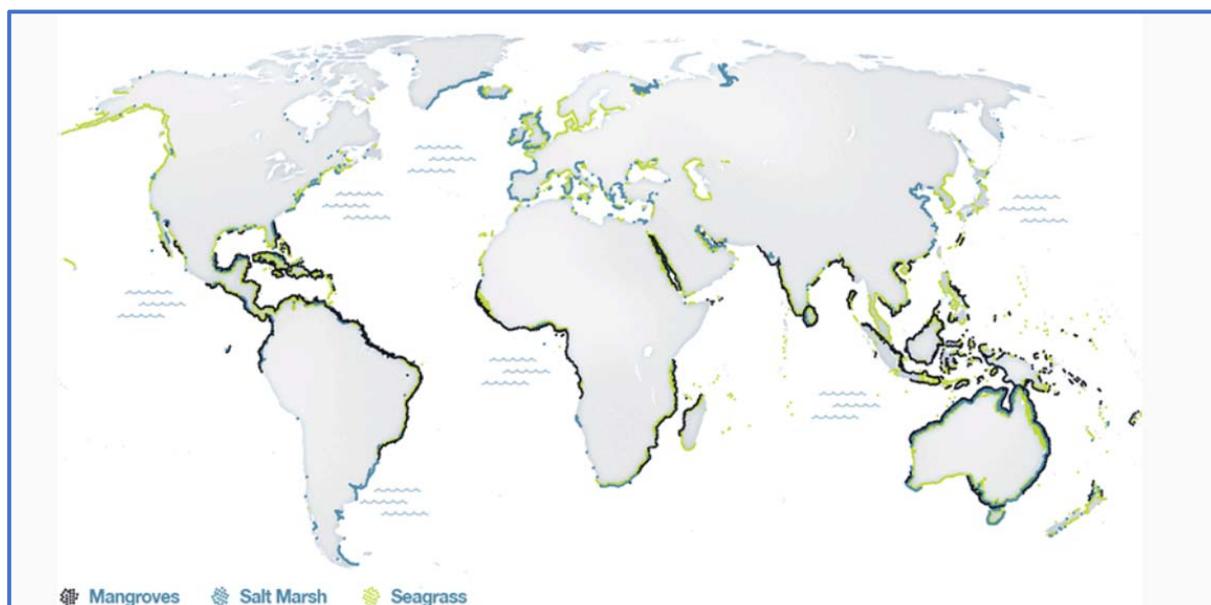
Situación

174. El enorme aumento de los gases atmosféricos de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), desde finales del siglo XIX ha intensificado el calentamiento global, y las principales causantes de este fenómeno han sido las emisiones de CO₂ generadas por la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio de uso de la tierra o las alteraciones antropógenas. El océano desempeña una función importante en la regulación del sistema climático global, al capturar y almacenar CO₂ que de otro modo estaría en la atmósfera, es decir, al actuar como un sumidero neto del CO₂ antropógeno y reducir en medida muy considerable el ritmo del calentamiento global.

175. Dos de los principales mecanismos por los que el océano captura CO₂ de la atmósfera son la bomba física o de solubilidad (la absorción del CO₂ por intercambio gaseoso y el descenso del agua enriquecida en CO₂ al océano profundo) y la bomba biológica (la exportación vertical del carbono orgánico particulado producido por fotosíntesis de las aguas superficiales al océano profundo).

Tendencias

176. El carbono orgánico capturado y almacenado por el océano se conoce como carbono azul. Los ecosistemas costeros vegetados, como las praderas marinas, las marismas y los manglares, acumulan y almacenan grandes cantidades de carbono orgánico en los sedimentos. Aunque esos ecosistemas ocupan una superficie total mucho menor que la de los ecosistemas forestales terrestres, tienen un potencial global de secuestro de carbono orgánico considerable y deberían ser tratados como un factor importante en las estrategias mundiales de adaptación al cambio climático basadas en la naturaleza (figura H-1). Estos mismos registros de sedimentos que se han datado mediante radioisótopos de período corto también pueden analizarse para detectar restos de contaminación por plásticos (figura H-2). Los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente elaboran modelos geocronológicos a partir de testigos de material sedimentario recogidos en manglares de zonas costeras utilizando, por ejemplo, excedentes de ²¹⁰Pb, ⁷Be, ²³⁴Th, y ¹³⁷Cs como radiotrazadores de período corto.



*Fig. H-1. Distribución mundial de los ecosistemas costeros de carbono azul.
(Adaptado a partir de <https://thebluecarboninitiative.org>)*

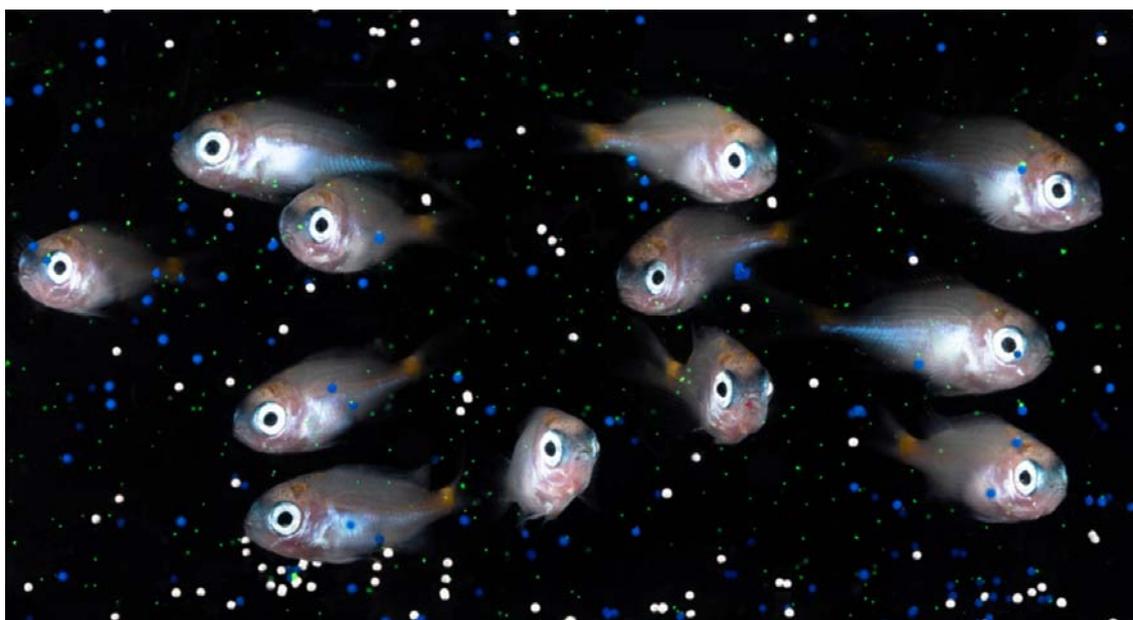


Fig. H-2. Peces expuestos a microplásticos como parte de las actividades de I+D llevadas a cabo en los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente, en Mónaco (Fotografía: OIEA)

177. Además, la magnitud actual de las pérdidas de carbono sedimentario causadas por la degradación generalizada de los hábitats crea el imperativo de adoptar medidas coordinadas de restauración de esos hábitats y establecimiento de otros nuevos, junto con la aplicación de soluciones creativas de ecoingeniería.

178. La inclusión de los ecosistemas costeros de carbono azul en las estrategias de mitigación existentes, a través del secuestro de carbono y las compensaciones por las emisiones de GEI, exige la cuantificación de las tasas de acumulación exactas del secuestro de carbono orgánico, que actualmente es limitada y está sujeta a grandes incertidumbres. La determinación del secuestro de carbono orgánico a escalas temporales del orden del milenio puede realizarse utilizando el carbono 14, mientras que para las estimaciones a escala decenal o secular se emplean radionucleidos presentes en el medio ambiente, como el plomo 210, el cesio 137 y algunos isótopos del plutonio. Esto ofrece un marco temporal compatible con las medidas de gestión requeridas en virtud de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y del Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el

Desarrollo Sostenible, y permite determinar el secuestro de carbono orgánico y su variación a lo largo del tiempo debido a las alteraciones naturales y de origen humano.

179. Los radionucleidos ofrecen también una posibilidad excepcional de evaluar si las perturbaciones naturales o antropógenas han causado pérdidas de carbono, por ejemplo por la puesta en suspensión de los sedimentos y los procesos de erosión. El uso de radionucleidos de períodos más cortos, entre ellos el torio 228, el torio 234 y el berilio 7, como trazadores de la dinámica de la sedimentación a escalas semanales, mensuales o incluso de algunos años sería compatible con el establecimiento de marcos de políticas sobre el carbono azul que apoyaran la cuantificación y la financiación de la reducción de las emisiones de carbono.

180. Aunque en el último decenio se realizaron una serie de estudios sobre el carbono azul en las zonas costeras vegetadas (figura H-3), muchos interrogantes aún no tienen respuesta. Entre ellos figuran aspectos tales como la evaluación de las zonas críticas del mundo que están muy poco estudiadas (como los pastos marinos y los manglares del Brasil y de Asia); las repercusiones que tendrán el cambio climático y otras perturbaciones en el carbono azul en sistemas con vegetación costera; el papel de las macroalgas; y las mejores medidas de ordenación para mantener e intensificar el secuestro de carbono en los hábitats costeros del carbono azul. Las técnicas nucleares y de base nuclear son fundamentales para evaluar la función del carbonato y las macroalgas en el ciclo del carbono, determinar la procedencia del carbono, entender los factores que influyen en el secuestro en los hábitats del carbono azul y los correspondientes balances, y determinar las medidas de ordenación adecuadas para promover las estrategias basadas en ese carbono.



*Fig. H-3. Testigos de sedimentos extraídos frente a la costa de Zanzibar (República Unida de Tanzania) para determinar las cantidades de carbono orgánico presentes y sus tasas de enterramiento, como forma de medir el potencial de secuestro de carbono.
(Fotografía: Gloria Salgado, Universidad Edith Cowan, Perth, Australia)*

181. El Organismo se ha propuesto estudiar varios aspectos de la ciencia del carbono azul y transferir las tecnologías nucleares pertinentes durante el próximo decenio. Por conducto de los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente, está participando actualmente en proyectos relativos al carbono azul en Australia, el Brasil, Dinamarca, los Estados Unidos de América, Francia, la India, Myanmar, Nueva Zelandia y la República Unida de Tanzania. También está trabajando en un proyecto innovador coordinado por Oceans 2050, para determinar la capacidad de secuestro de carbono de los cultivos de

algas de todo el mundo. Se están desarrollando proyectos de cooperación técnica a nivel nacional y regional a fin de evaluar la importancia del secuestro de carbono de los sistemas acuáticos para las estrategias de adaptación al cambio climático basadas en la naturaleza, la conservación del medio ambiente y los beneficios socioeconómicos.

Anexo

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2020)^a

| PAÍS | Reactores en funcionamiento | | Reactores en construcción | | Electricidad nuclear suministrada en 2020 | | Experiencia operacional total hasta el final de 2020 | |
|------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---|-------------|--|-----------|
| | Nº de unidades | Total de MW(e) | Nº de unidades | Total de MW(e) | TW·h | % del total | Años | Meses |
| ALEMANIA | 6 | 8113 | | | 60,9 | 11,3 | 852 | 7 |
| ARGENTINA | 3 | 1641 | 1 | 25 | 10,0 | 7,5 | 91 | 2 |
| ARMENIA | 1 | 415 | | | 2,6 | 34,5 | 46 | 8 |
| BANGLADESH | | | 2 | 2160 | | | | |
| BELARÚS | 1 | 1110 | 1 | 1110 | 0,3 | 1,0 | 0 | 2 |
| BÉLGICA | 7 | 5942 | | | 32,8 | 39,1 | 310 | 7 |
| BRASIL | 2 | 1884 | 1 | 1340 | 13,2 | 2,1 | 59 | 3 |
| BULGARIA | 2 | 2006 | | | 15,9 | 40,8 | 169 | 3 |
| CANADÁ | 19 | 13624 | | | 92,2 | 14,6 | 788 | 6 |
| CHINA | 50 | 47528 | 13 | 12565 | 344,7 | 4,9 | 418 | 8 |
| COREA, REPÚBLICA DE | 24 | 23150 | 4 | 5360 | 152,6 | 29,6 | 596 | 2 |
| EMIRATOS ÁRABES UNIDOS | 1 | 1345 | 3 | 4035 | 1,6 | 1,1 | 0 | 5 |
| ESLOVAQUIA | 4 | 1837 | 2 | 880 | 14,4 | 53,1 | 176 | 7 |
| ESLOVENIA | 1 | 688 | | | 6,0 | 37,8 | 39 | 3 |
| ESPAÑA | 7 | 7121 | | | 55,8 | 22,2 | 350 | 1 |
| ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA | 94 | 96553 | 2 | 2234 | 789,9 | 19,7 | 4600 | 10 |
| FEDERACIÓN DE RUSIA | 38 | 28578 | 3 | 3459 | 201,8 | 20,6 | 1372 | 5 |
| FINLANDIA | 4 | 2794 | 1 | 1600 | 22,4 | 33,9 | 167 | 4 |
| FRANCIA | 56 | 61370 | 1 | 1630 | 338,7 | 70,6 | 2337 | 0 |
| HUNGRÍA | 4 | 1902 | | | 15,2 | 48,0 | 142 | 2 |
| INDIA | 22 | 6255 | 7 | 4824 | 40,4 | 3,3 | 548 | 11 |
| IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL | 1 | 915 | 1 | 974 | 5,8 | 1,7 | 9 | 4 |
| JAPÓN | 33 | 31679 | 2 | 2653 | 43,1 | 5,1 | 1932 | 6 |
| KAZAJSTÁN | | | | | | | 25 | 10 |
| MÉXICO | 2 | 1552 | | | 10,9 | 4,9 | 57 | 11 |
| PAÍSES BAJOS | 1 | 482 | | | 3,9 | 3,3 | 76 | 0 |
| PAKISTÁN | 5 | 1318 | 2 | 2028 | 9,6 | 7,1 | 87 | 5 |
| REINO UNIDO | 15 | 8923 | 2 | 3260 | 45,7 | 14,5 | 1634 | 7 |
| REPÚBLICA CHECA | 6 | 3934 | | | 28,4 | 37,3 | 176 | 10 |
| RUMANIA | 2 | 1300 | | | 10,6 | 19,9 | 37 | 11 |
| SUDÁFRICA | 2 | 1860 | | | 11,6 | 5,9 | 72 | 3 |
| SUECIA | 6 | 6882 | | | 47,4 | 29,8 | 474 | 0 |
| SUIZA | 4 | 2960 | | | 23,0 | 32,9 | 228 | 11 |
| TURQUÍA | | | 2 | 2228 | NA | NA | | |
| UCRANIA | 15 | 13107 | 2 | 2070 | 71,5 | 51,2 | 533 | 6 |
| Total^{b,c}: | 442 | 392612 | 52 | 54435 | 2553,2 | | 18772 | 10 |

a. Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (www.iaea.org/pris) a 1 de junio de 2021.

b. Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 4 unidades en funcionamiento, 3844 MW(e).

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses) y Lituania (43 años y 6 meses) y las centrales en funcionamiento y en régimen de parada de Taiwán (China) (232 años y 8 meses).

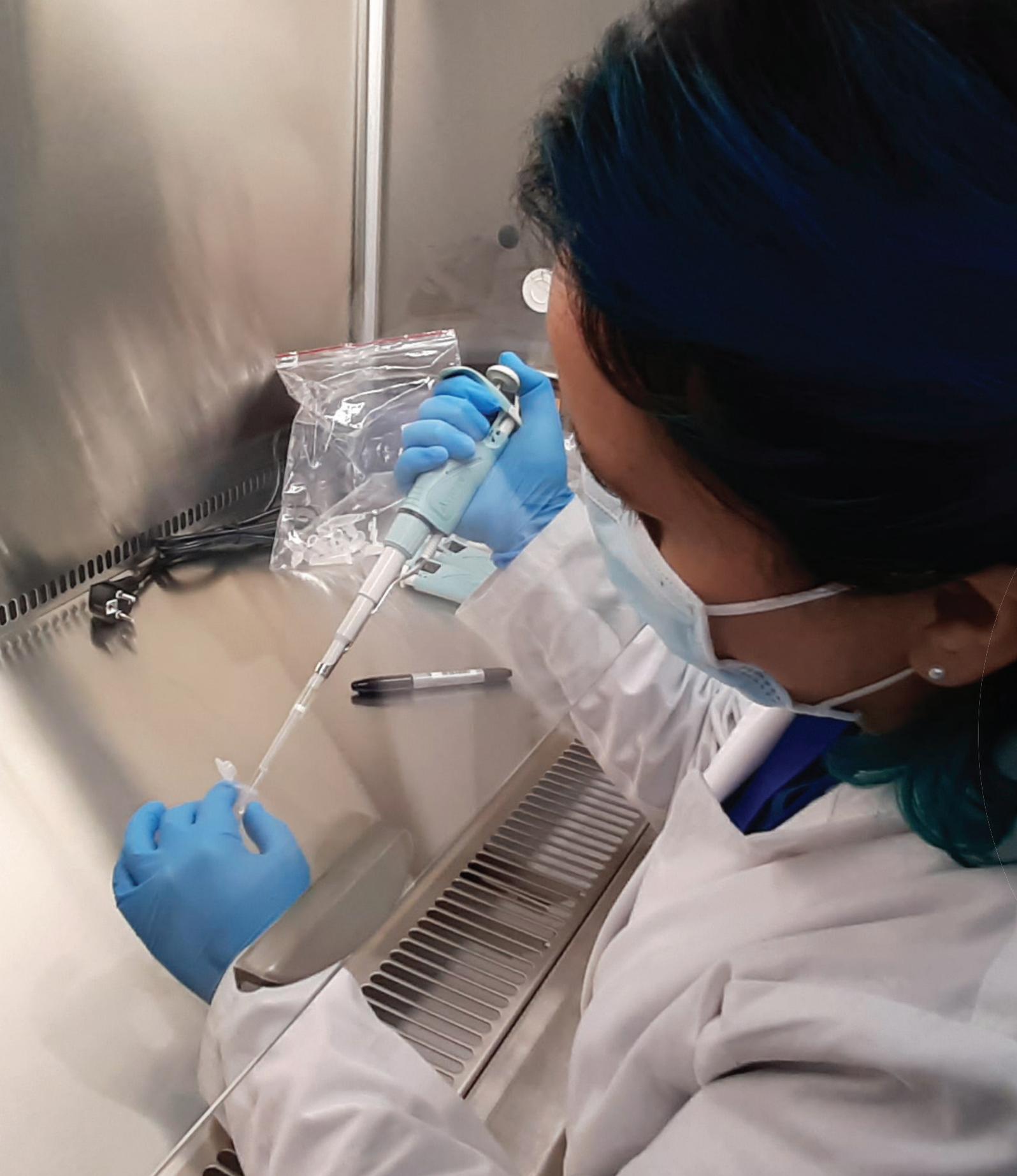
Cuadro D-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo

| Tipo de aplicación ^a | Número de reactores de investigación ^b | Número de Estados Miembros que tienen esas instalaciones |
|--|---|--|
| Enseñanza/capacitación | 161 | 50 |
| Análisis por activación neutrónica | 116 | 49 |
| Producción de radioisótopos | 82 | 41 |
| Radiografía neutrónica | 70 | 37 |
| Irradiación de materiales/combustibles | 67 | 26 |
| Dispersión neutrónica | 44 | 28 |
| Geocronología | 23 | 20 |
| Transmutación (dopado del silicio) | 22 | 15 |
| Transmutación (gemas) | 19 | 12 |
| Terapia neutrónica, principalmente I+D | 15 | 12 |
| Medición de datos nucleares | 14 | 7 |
| Otras ^c | 117 | 34 |

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

^b De un total de 236 reactores de investigación examinados (221 en funcionamiento y 15 en régimen de parada temporal a noviembre de 2020).

^c Otras aplicaciones son la calibración y el ensayo de instrumentos, los experimentos de blindaje, la creación de fuentes de positrones y los estudios de incineración de desechos nucleares.



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica
Átomos para la paz y el desarrollo

Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Viena, Austria
Teléfono: (+43-1) 2600-0
Fax: (+43-1) 2600-7
Correo electrónico: Official.Mail@iaea.org
www.iaea.org