

# Examen de la Tecnología Nuclear de ■ 2024

Informe del Director General



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

*Átomos para la paz y el desarrollo*

GC(68)/INF/4



# Examen de la Tecnología Nuclear de 2024

## Informe del Director General

GC(68)/INF/4

Impreso por el OIEA en Austria  
Septiembre de 2024  
IAEA/NTR/2024



## Índice

Resumen.....	5
Prefacio del Director General.....	7
Resumen ejecutivo .....	9
A. Energía nucleoelectrica .....	14
A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrica .....	14
A.2. Centrales nucleares en funcionamiento .....	15
A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansion .....	17
A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica .....	21
A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua .....	22
A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares y microrreactores .....	23
A.4.3. Reactores rápidos .....	27
A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica .....	28
B. Ciclo del combustible nuclear .....	30
B.1. Parte inicial .....	30
B.2. Parte final .....	35
C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos.....	38
C.1. Clausura .....	38
C.2. Rehabilitación ambiental y gestión del material radiactivo natural (NORM) .....	40
C.3. Gestión de desechos radiactivos .....	42
D. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión para la producción de energía en el futuro .....	47
E. Reactores de investigación, aceleradores de partículas e instrumentación nuclear.....	55
E.1. Reactores de investigación.....	55
E.2. Aceleradores de partículas .....	59
E.3. Instrumentación nuclear .....	62
F. Datos atómicos y nucleares .....	64
G. Aplicación de la inteligencia artificial en la energía nucleoelectrica y en el ciclo del combustible nuclear .....	65
H. Salud humana .....	66
H.1. Evaluación no invasiva de la función digestiva del intestino: una prueba del aliento optimizada con sacarosa marcada con carbono 13 .....	66
H.2. Garantizar la calidad: novedades en el ámbito de la braquiterapia.....	69
H.3. Ver el corazón por dentro: el papel crucial de la imagenología nuclear en el diagnóstico de la amiloidosis cardíaca.....	73
I. Alimentación y agricultura .....	76
I.1. Tecnologías de irradiación para el desarrollo de vacunas: aplicaciones de las tecnologías nucleares para prevenir enfermedades infecciosas en el ganado.....	76

I.2. Uso combinado de la tecnología nuclear basada en sondas de neutrones de rayos cósmicos y las imágenes de teledetección para la gestión del agua para uso agrícola.....	78
J.    Tecnología radioisotópica y de la radiación .....	82
J.1. Sistemas novedosos de administración de radiofármacos con direccionamiento celular ..	82
J.2. Empleo de la tecnología de radiotrazadores y los humedales artificiales para recuperar las aguas residuales de la minería .....	85
K.    Hidrología isotópica .....	88
K.1. Seguimiento del ciclo del agua: nuevos avances en el análisis del tritio.....	88
L.    Medio ambiente marino.....	91
L.1. Inteligencia artificial para mejorar la vigilancia y la investigación de la contaminación por microplásticos en el océano.....	91
Anexo .....	95
Lista de abreviaciones y acrónimos .....	98

## Resumen

- En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio *Examen de la Tecnología Nuclear*. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en el que se destacan las novedades importantes ocurridas en 2023.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2024* trata sobre los siguientes temas: la energía nucleoelectrica; el ciclo del combustible nuclear; la clausura, la rehabilitación ambiental y la gestión de residuos radiactivos; la investigación y el desarrollo tecnológico de la fusión para la producción de energía en el futuro; los reactores de investigación, los aceleradores de partículas y la instrumentación nuclear; los datos atómicos y nucleares; la inteligencia artificial en la energía nucleoelectrica y en el ciclo del combustible nuclear; la salud humana; la alimentación y la agricultura; la tecnología radioisotópica y de la radiación; la hidrología isotópica; y el medio ambiente marino.
- La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores en su reunión de marzo de 2024 en el documento GOV/2024/2. Esta versión final se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones de la Junta de Gobernadores así como las observaciones recibidas de los Estados Miembros.



## Prefacio del Director General

Las tecnologías nucleares desempeñan un papel importante al hacer frente a muchos de los desafíos actuales más apremiantes, ya se trate de producir energía de forma fiable y con bajas emisiones de carbono o de resolver problemas relacionados con la alimentación, la salud, el agua y el medio ambiente.

En 2023 se siguió manifestando un gran interés por la energía nucleoelectrica, tanto para cumplir los objetivos climáticos como para afrontar el reto de la seguridad energética y la asequibilidad de la energía, y varios Estados Miembros revisaron sus políticas en materia de energía nuclear. En la 28ª Conferencia de las Partes (C P 28) en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que tuvo lugar en Dubái (Emiratos Árabes Unidos), el Organismo celebró una serie de actos en su pabellón Atoms4Climate sobre la gran contribución que puede realizar la energía nuclear a la descarbonización de sectores en los que esta tarea resulta difícil y la producción de hidrógeno, promoviendo así una descarbonización rápida. El 1 de diciembre de 2023 se hizo pública la Declaración del OIEA sobre la Energía Nucleoelectrica, que hicieron suya decenas de Estados Miembros y recalca que la energía nucleoelectrica es necesaria para lograr emisiones netas cero. Eso lo había confirmado unos meses antes la versión actualizada de la hoja de ruta de la Agencia Internacional de Energía *Net Zero by 2050*, que prevé que la capacidad nuclear se duplicará con creces para 2050, lo cual está en consonancia con las proyecciones altas del OIEA publicadas en septiembre de 2023. Asimismo, durante la C P 28, más de 20 países exhortaron en una declaración a triplicar la capacidad nuclear para 2050 e invitaron a los bancos regionales de desarrollo y a las instituciones financieras internacionales a incluir la energía nuclear en sus políticas de préstamos, subrayando al mismo tiempo la necesidad de contar con cadenas de suministro seguras para acelerar el despliegue de esta tecnología. Como resultado de la colaboración con nuestros asociados y de la labor y la determinación de los años anteriores, por primera vez desde que, en 1995, comenzaron las cumbres anuales sobre el clima, al concluir la C P 28 se había alcanzado un logro importante. En el primer balance mundial, aprobado por 198 países signatarios de la Convención, la tecnología nuclear se mencionó explícitamente como una de las tecnologías de bajas emisiones necesarias para lograr reducciones acusadas y rápidas de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Al mismo tiempo, cada vez más países utilizan las tecnologías nucleares para aplicaciones no eléctricas, como reforzar la seguridad alimentaria, hacer frente a los efectos del cambio climático, proteger el medio ambiente de la contaminación y mejorar la atención del cáncer y otras enfermedades potencialmente mortales. Como se destaca en el presente informe, el Organismo sigue innovando en estas y otras esferas clave mediante la labor que llevan a cabo sus laboratorios de aplicaciones nucleares, ubicados en Austria y Mónaco; proyectos coordinados de investigación; y alianzas con instituciones de investigación punteras de todo el mundo. En muchos ámbitos de las actividades de investigación y desarrollo del Organismo, la inteligencia artificial se emplea cada vez más para ayudar a impulsar la innovación, tendencia que seguirá creciendo.

La investigación y los datos científicos son la base de la toma de decisiones fundamentadas, y el Organismo busca constantemente oportunidades para que sus actividades de investigación y desarrollo ayuden a los países a sacar el máximo partido de las ciencias y tecnologías nucleares a fin de proteger y mejorar la salud y el bienestar de la población. El Organismo, como continuación de sus iniciativas Medidas Integradas contra las Enfermedades Zoonóticas (ZODIAC), TECnología NUClear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics) y Rayos de Esperanza, y ante el aumento de la inseguridad alimentaria en todo el mundo en 2023, puso en marcha junto con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura una iniciativa conjunta, Atoms4Food, para ayudar a los países a aumentar la seguridad alimentaria y nutricional utilizando técnicas nucleares, en particular mediante una agricultura climáticamente inteligente y prácticas mejoradas de gestión de los recursos hídricos desarrolladas en los laboratorios del Organismo.



*Fig. FW.1. El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, durante su intervención en la C P 28, celebrada en Dubái (Emiratos Árabes Unidos). (Fotografía: OIEA)*

La ciencia y la tecnología nucleares llevan decenios siendo instrumentos importantes para ayudar a los países a satisfacer sus necesidades de desarrollo. Sin lugar a dudas, pueden contribuir más y en más ámbitos. El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2024*, al poner de manifiesto algunos de los avances clave en materia de tecnología nuclear que se han producido en 2023, ayudará a los Estados Miembros a tomar decisiones fundamentadas cuando enfrenten los desafíos actuales y futuros.

## Resumen ejecutivo

1. Por tercer año consecutivo, el Organismo ha revisado al alza sus proyecciones anuales sobre el crecimiento potencial de la energía nucleoelectrica en los próximos decenios, y ha confirmado que existe un interés renovado en la energía nucleoelectrica en el contexto de las crisis de la seguridad energética y el cambio climático, así como una mayor demanda de electrificación y la necesidad de encontrar alternativas a los combustibles fósiles para suministrar calor e hidrógeno a fin de descarbonizar el sector industrial y el del transporte. El Organismo ha aumentado su proyección baja hasta los 458 gigavatios (GW) para 2050, lo cual supone un aumento considerable, de 55 GW, con respecto a la proyección baja de 2022. La proyección alta para 2050 ha pasado a ser de 890 GW, lo cual representa un incremento respecto de los 873 GW correspondientes a la proyección alta del año anterior y un aumento de 175 GW frente a la proyección de 2020.

2. A diciembre de 2023, la capacidad nucleoelectrica mundial en explotación se situaba en 371,5 gigavatios (eléctricos) (GW(e)), generados por 413 reactores nucleares en funcionamiento en 31 Estados Miembros. Además, durante el año la operación 21,3 GW(e) (25 reactores) de capacidad operacional con licencia de explotación se mantuvo suspendida. En 2023 se conectaron a la red 5 GW(e) de nueva capacidad nucleoelectrica procedente de cinco reactores y se restablecieron otros 1,6 GW(e) de dos reactores que habían mantenido sus operaciones suspendidas anteriormente y se volvieron a conectar a la red. De acuerdo con informes de los Estados Miembros, el parque mundial de energía nucleoelectrica generó aproximadamente 2515,2 teravatios-hora (TWh) de electricidad con bajas emisiones de carbono y distribuible<sup>1</sup>. Al final de 2023 había en construcción en 17 países una capacidad total de 61,1 GW(e) (59 reactores). Casi el 67 % de la capacidad mundial de reactores operativa se ha estado utilizando por más de 30 años. Durante el mismo período se sacaron de servicio permanentemente 6 GW(e) de capacidad nuclear (5 reactores).

3. Actualmente hay unos 50 países interesados en añadir la energía nucleoelectrica a su matriz energética. De ellos, 27 se encuentran en diferentes fases de iniciación y ejecución de su programa nacional de energía nucleoelectrica. Para 2035, el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría aumentar en un 30 % gracias a la incorporación de entre 10 y 12 nuevos países con centrales nucleares en funcionamiento frente a los 31 países actuales. Este creciente interés requiere un desarrollo adecuado de la infraestructura nuclear.

4. Los reactores refrigerados por agua han sido la tecnología predominante utilizada en las centrales nucleares de todo el mundo. La atención que se presta a escala mundial al desarrollo de la tecnología nucleoelectrica está impulsada por la necesidad de acelerar el despliegue de reactores avanzados, incluidos los reactores modulares pequeños (SMR). La tendencia actual en el desarrollo de los SMR se centra en mejorar sus aspectos económicos, sus características de seguridad y su escalabilidad. Ha aumentado el interés de los Estados Miembros por las centrales nucleares flotantes y los microrreactores, así como por sus aplicaciones, y varios países están desarrollando diseños de SMR marinos para centrales nucleares flotantes.

5. El uso de la energía nuclear para aplicaciones no eléctricas, como la calefacción urbana, la desalación y el suministro directo de calor para diversos procesos industriales, es una tecnología consolidada: actualmente hay 65 reactores en funcionamiento en varios Estados Miembros y muchos otros están cada vez más interesados en esta opción.

---

<sup>1</sup> La producción total de electricidad no incluye las unidades de reactor de Ucrania, ya que en el momento de la publicación no se habían facilitado datos operativos correspondientes a 2023.

6. En cuanto a los reactores rápidos, la atención se ha centrado en mejorar las medidas de seguridad mediante la incorporación de sistemas pasivos de parada y el estudio de diferentes refrigerantes, especialmente en el contexto de los diseños de reactores innovadores. El despliegue a mediano plazo de los sistemas de neutrones rápidos se basa en los reactores rápidos refrigerados por sodio como opción preferencial.

7. Las actividades de investigación y desarrollo en materia de utilización de la inteligencia artificial (IA) han demostrado el potencial de esta para optimizar eficazmente el diseño del núcleo en aplicaciones de reactores nucleares de potencia y avanzados. También pueden mejorar la seguridad, la eficiencia operacional y la relación costo-eficacia, al tiempo que facilitan el desarrollo de tecnologías nucleares avanzadas.

8. En el ámbito de la energía de fusión, las empresas del sector privado están recibiendo cada vez más inversiones, puesto que muchas pretenden desarrollar de forma independiente sus propias investigaciones y dispositivos de demostración. Al mismo tiempo, se están empezando a forjar alianzas público-privadas en el ámbito de la fusión, lo cual refleja el crecimiento general de la financiación destinada a la energía de fusión, que en 2023 experimentó un aumento interanual total de 6210 millones de dólares (frente a los 4800 millones de dólares registrados en 2022). También está aumentando la diversidad geográfica de la industria de la fusión, pues hay 43 empresas activas en 12 países. Los órganos reguladores y los legisladores también están empezando a abordar los desafíos y las oportunidades que presenta este tipo de energía.

9. El Consejo del ITER, órgano rector de la Organización ITER, siguió examinando los planes revisados para el ITER según los cuales se dejará de usar el berilio como material de la primera pared en favor del tungsteno. Además, la Organización ITER siguió finalizando estrategias y contratos con proveedores para reparar componentes clave; al mismo tiempo, siguió trabajando con la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia. En 2023, investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de los Estados Unidos repitieron en al menos tres ocasiones el avance revolucionario de la ignición de la energía de fusión logrado en la Instalación Nacional de Ignición en diciembre de 2022.

10. Según las previsiones mundiales del informe *Uranium 2022: Resources, Production and Demand* (Libro Rojo 2022), se estima que la demanda de uranio se situará entre 60 960 toneladas de uranio (t U) (escenario de baja demanda) y 76 592 t U (escenario de alta demanda) para 2030, y para 2040, entre 63 040 t U (escenario de baja demanda) y 108 272 t U (escenario de alta demanda). A medida que comiencen sus operaciones, entre 2023 y 2040, hay minas planificadas y potenciales en 19 países que podrían contribuir a una capacidad de producción total nominal a nivel mundial de 77 138 t U por año. Según el Libro Rojo 2022, en 2021 el gasto a escala mundial en materia de prospección y desarrollo aumentó ligeramente, en alrededor de 2,8 millones de dólares de los Estados Unidos, tras la disminución de 2000 millones de dólares de los Estados Unidos registrada de 2014 a 2020.

11. En el próximo decenio, la industria de la producción de combustible nuclear experimentará una demanda cada vez mayor, respecto de todos los tipos de combustible nuclear, debido al aumento de los programas de construcción en países con programas establecidos y en países en fase de incorporación, con objetivos ambiciosos de desarrollo de nuevos tipos de combustible, comprendidos los combustibles para SMR y reactores avanzados. En lo que respecta a la producción de uranio poco enriquecido plus (UPE+) y particularmente de uranio poco enriquecido de alta concentración (UPEAC), es necesario abordar cuestiones de seguridad tecnológica y física que van desde el establecimiento de un nuevo proceso de concesión de licencias y la actualización de reglamentos hasta la existencia de una infraestructura especialmente diseñada de la cadena de suministro.

12. El combustible nuclear gastado almacenado se acumula a un ritmo de aproximadamente 7000 toneladas de metal pesado (t HM) al año en todo el mundo, y las existencias almacenadas superan

las 300 000 t HM. Para los países con programas nucleares establecidos desde hace tiempo que siguen estrategias de ciclo abierto, los principales retos siguen siendo la necesidad de capacidad adicional de almacenamiento de combustible nuclear gastado y la duración cada vez mayor del almacenamiento previo a la disposición final.

13. A escala mundial se han retirado permanentemente del servicio 210 reactores nucleares. El número de instalaciones sometidas a desmantelamiento activo sigue aumentando y se observa una tendencia al desmantelamiento temprano de las instalaciones tras la parada definitiva. Las tecnologías digitales desempeñarán una función cada vez más importante en el fomento de la clausura de instalaciones nucleares, en particular el uso de robots móviles para analizar las condiciones físicas y radiológicas de las estructuras.

14. La tendencia mundial a adoptar principios y prácticas de gestión integrada de los desechos radiactivos contribuye a optimizar la manipulación de los desechos, desde su generación hasta su disposición final. La gestión integrada de los desechos racionaliza los procesos, mitiga los riesgos ambientales y promueve una gestión responsable de los desechos radiactivos. Además, con la tendencia creciente a adoptar la jerarquía de los desechos radiactivos se pretende reducir el volumen de los desechos radiactivos destinados a instalaciones de disposición final, lo que se traduce en la conservación de esas instalaciones como activos valiosos a largo plazo.

15. Al final de 2023 había 234 reactores de investigación en funcionamiento, incluidos los que estaban en régimen de parada temporal, en 54 países. Además, se encontraban en construcción 11 nuevos reactores de investigación, incluido 1 sistema accionado por acelerador, en diez países, y 14 Estados Miembros tenían previsto oficialmente construir nuevos reactores de investigación. El envejecimiento progresivo del parque mundial de reactores de investigación ha obligado a los explotadores y reguladores a adoptar nuevas técnicas y metodologías destinadas a evaluar las condiciones de funcionamiento de esos reactores para que sigan funcionando en condiciones de seguridad.

16. Los estudios científicos detallados dependen del número de neutrones que puede producir y poner a disposición de los investigadores una fuente de neutrones. Por consiguiente, además de los reactores de investigación, los científicos e ingenieros prosiguieron el desarrollo de una nueva generación de fuentes de neutrones basadas en aceleradores de partículas y en la tecnología del blanco de espalación.

17. Los aceleradores de partículas desempeñan un papel fundamental en la imagenología y la irradiación subcelulares para el tratamiento del cáncer. Para el diagnóstico médico se utiliza habitualmente una amplia variedad de técnicas de imagenología, como las ecografías, la tomografía computarizada y la obtención de imágenes por resonancia magnética. El perfeccionamiento de las técnicas de manipulación de haces de iones y rayos X ha permitido enfocar dichos haces a escala nanométrica, lo que posibilita métodos novedosos de imagenología multiespectral que pueden aplicarse en la imagenología médica, así como en la visualización de objetos.

18. Cada vez es más habitual el uso de matrices de puertas programables *in situ* como parte indisoluble de los sistemas de adquisición de datos de los detectores de radiación. La finalidad de dichas matrices es muy variada, y abarca desde la configuración de los parámetros de los sistemas de adquisición de datos y la transmisión o el enrutamiento de datos hasta la discriminación avanzada de señales o incluso la reconstrucción completa de sucesos. Los algoritmos de tratamiento de datos que se utilizan constituyen la base de funciones más complejas, ya sean convencionales o basadas en la IA.

19. Varios Estados Miembros están invirtiendo más recursos en el ITER a fin de obtener datos de alta calidad relativos a las interacciones gamma. Las principales aplicaciones de esos datos son la exploración neutrónica activa, estimaciones más precisas del calentamiento por rayos gamma en el blindaje de los reactores de fisión y dispositivos de fusión e innovaciones en aplicaciones espaciales.

20. Una de las cuestiones más acuciantes de salud pública en materia de nutrición es por qué los niños de los países de ingreso mediano y bajo siguen teniendo baja estatura para su edad a pesar de las múltiples intervenciones de salud pública. La enteropatía ambiental es cada vez más frecuente en los niños que viven en condiciones insalubres en países de ingreso mediano y bajo. El Organismo ha apoyado la optimización de una prueba del aliento no invasiva, destinada a medir la digestión de la sacarosa como indicador de la capacidad funcional del intestino delgado en la enteropatía ambiental, que puede utilizarse en todos los grupos de edad. Si se desean obtener resultados más globales, se puede utilizar junto con otras pruebas para abarcar aspectos adicionales de la enteropatía ambiental más allá de la digestión de la sacarosa.

21. El cáncer cervicouterino es el cuarto tipo de cáncer más frecuente en las mujeres a escala mundial. La braquiterapia, componente esencial de la radioterapia que desempeña un papel fundamental en el tratamiento de esa enfermedad, se debe optimizar de manera meticulosa a fin de evitar efectos adversos derivados de una dosis insuficiente o excesiva. El Organismo está elaborando una nueva metodología de verificación dosimétrica para mejorar la calidad de los tratamientos de braquiterapia. También está trabajando para cubrir el déficit cada vez mayor en el ámbito de la enseñanza y la capacitación sobre braquiterapia en los países de ingreso mediano y bajo, que se ve agravado por la creciente complejidad de la tecnología y la falta de equipos de capacitación. El Organismo está utilizando una herramienta de realidad virtual eficaz en función del costo con la que se pueden salvar las limitaciones físicas, geográficas y logísticas para que los usuarios puedan practicar la braquiterapia. Al combinar la verificación dosimétrica con herramientas educativas innovadoras, el Organismo está adoptando un enfoque integral para mejorar las capacidades de los profesionales sanitarios que trabajan en el ámbito de la braquiterapia.

22. Los avances recientes en investigación médica y estrategias terapéuticas han supuesto el inicio de una nueva era de esperanza para los pacientes con amiloidosis cardíaca. Los medicamentos innovadores que actúan sobre los mecanismos subyacentes de los depósitos de amiloides, junto con las herramientas mejoradas de diagnóstico por la imagen, como las de cardiología nuclear, han permitido a los proveedores de atención médica intervenir antes y con más eficacia. La cardiología nuclear, mediante el uso de técnicas de imagenología avanzadas, permite detectar con precisión la amiloidosis cardíaca y diferenciarla de otras cardiopatías. La naturaleza no invasiva de estas técnicas las hace especialmente valiosas para la evaluación exhaustiva de la amiloidosis cardíaca, lo que contribuye a un tratamiento más oportuno y preciso de la enfermedad.

23. Las vacunas suelen ser la estrategia más eficaz en función del costo para prevenir enfermedades en el ganado, que pueden causar enormes pérdidas económicas a escala mundial. Hace poco ha resurgido el interés por el uso de la irradiación para la producción de vacunas, debido a la aparición de nuevos irradiadores que pueden administrar dosis de radiación precisas en períodos más cortos, y a un mejor conocimiento del sistema inmunitario, que permite evaluar con mayor eficacia las repuestas a la vacunación. Asimismo, los avances técnicos han posibilitado el uso de haces de electrones y otros métodos de irradiación para inactivar agentes patógenos, gracias a lo cual se han podido dejar de utilizar sustancias radiactivas para producir vacunas irradiadas.

24. Tres mil millones de personas que viven en regiones agrícolas sufren un grado elevado o muy elevado de escasez de agua, y el cambio climático empeorará la situación. En la actualidad, la tecnología basada en sondas de neutrones de rayos cósmicos se emplea en combinación con imágenes de teledetección de alta resolución para monitorizar la humedad del suelo en grandes extensiones de terreno o a nivel de cuencas hidrográficas. Esta tecnología puede revolucionar el uso de la teledetección para la irrigación climáticamente inteligente, lo que mejoraría considerablemente el acceso que tienen los responsables de la toma de decisiones y las comunidades agrícolas a información de referencia. También ofrece posibles aplicaciones en el ámbito de la investigación ambiental, como los análisis de tendencias en cuanto a la humedad del suelo, la modelización de la productividad hídrica de los cultivos, el

seguimiento de los cambios en la disponibilidad de agua en los humedales y la predicción de las sequías, y proporciona datos para respaldar las políticas de adaptación al cambio climático.

25. Los radiofármacos ofrecen un método seguro y eficaz para administrar radionucleidos a órganos, tejidos o dianas celulares con fines diagnósticos o terapéuticos. Pueden administrarse en combinación con métodos de premarcado, tratamientos de quimioterapia combinada o radiosensibilizadores. Los métodos de premarcado pueden transformar las estrategias teranósticas, pues permiten utilizar radionucleidos con períodos de semidesintegración cortos, lo que reduce las posibilidades de que se vea expuesto a la radiación el tejido sano. Se están estudiando exhaustivamente los nanosistemas de administración, incluidos los nanosistemas teranósticos, a fin de mejorar la seguridad y eficacia de los medicamentos. Se espera que la administración de nanopartículas traiga consigo numerosas ventajas, como una mejor concentración del radionucleido terapéutico en la diana con menos efectos secundarios.

26. Los humedales artificiales representan una alternativa eficaz en función del costo y respetuosa con el medio ambiente a las depuradoras convencionales de aguas residuales, debido a su bajo consumo de energía y a su sencilla infraestructura mecánica. Son adecuados para tratar todo tipo de aguas residuales, incluidas las procedentes de la industria minera. Sin embargo, para optimizar los procesos de tratamiento se debe comprender mejor cómo funciona su compleja hidrodinámica. El Organismo está investigando el uso de la tecnología de radiotrazadores para establecer protocolos y directrices y validar modelos de flujo para los humedales artificiales; para mejorar el rendimiento hidráulico de los humedales artificiales para la recuperación de las aguas residuales de la minería; para optimizar la eficacia de la eliminación de contaminantes en los humedales artificiales; y para predecir la respuesta dinámica de un humedal en diversas condiciones.

27. El tritio es el único isótopo radiactivo que se incorpora a la molécula de agua, por lo que resulta un valioso trazador de los procesos del ciclo del agua. Debido a la brevedad de su período de semidesintegración, se utiliza principalmente para estimar la recarga de agua subterránea y evaluar la vulnerabilidad a la contaminación. Debido a la baja concentración actual de tritio en las aguas naturales, la medición del contenido de este elemento se ha vuelto difícil a nivel técnico. Para obtener resultados exactos y precisos para las aplicaciones hidrológicas, es preciso un enriquecimiento considerable en tritio. El Organismo ha desarrollado y sometido a numerosas pruebas un innovador sistema de membranas electrolíticas poliméricas para el enriquecimiento en tritio, que promete revolucionar la capacidad de los países de determinar la concentración de tritio en las muestras de agua ambiental a niveles ultrabajos, para fines de vigilancia tanto hidrológica como radiológica.

28. La IA se perfila como una herramienta fundamental en la esfera de la detección de microplásticos y su caracterización. A pesar de los avances en los conocimientos sobre la contaminación marina por plásticos, sigue siendo difícil cuantificar y caracterizar los microplásticos. El empleo por la IA de algoritmos de aprendizaje automático para desentrañar las complejidades de los polímeros degradados en el medio marino representa un cambio de paradigma. La rapidez de su análisis espectral, junto con la simulación de procesos físicos, químicos y biológicos para generar espectros de polímeros degradados, hacen de la IA una herramienta fundamental para mejorar la detección de microplásticos y su caracterización.

## A. Energía nucleoelectrónica

### A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrónica

#### Situación

1. Por tercer año consecutivo, el Organismo ha revisado al alza sus proyecciones anuales sobre el crecimiento potencial de la energía nucleoelectrónica en los próximos decenios, y ha confirmado que existe un interés renovado en la energía nucleoelectrónica en el contexto de las crisis de la seguridad energética y el cambio climático, así como una mayor demanda de electrificación y la necesidad de encontrar alternativas a los combustibles fósiles para suministrar calor e hidrógeno a fin de descarbonizar el sector industrial y el del transporte.

2. En su nueva perspectiva sobre la capacidad nuclear mundial para la generación de electricidad, el Organismo ha aumentado su proyección baja hasta los 458 gigavatios (GW) para 2050, lo cual supone un aumento considerable, de 55 GW, con respecto a la proyección baja de 2022. La proyección alta para

**890 GW**  
en **2050**

2050 pasó a ser de 890 GW, lo cual representa un incremento respecto de los 873 GW correspondientes a la proyección alta del año anterior y un aumento de 175 GW frente a la proyección de 2020. Para que tal previsión se materialice, sería preciso aplicar a gran escala la explotación a largo plazo de todo el parque actual de centrales nucleares y agregarle más de 600 GW en nueva capacidad de generación durante los tres próximos decenios. Para hacer realidad las proyecciones altas, además de ambiciosos programas de nuevas

construcciones, es fundamental la explotación a largo plazo del parque actual de centrales nucleares. La oferta de nuevas tecnologías, entre las que se incluyen los reactores modulares pequeños (SMR) y otros tipos de reactores avanzados, puede complementar a los reactores grandes brindando oportunidades para desplegar la energía nucleoelectrónica con miras a satisfacer distintas necesidades y superar limitaciones (por ejemplo, países con redes pequeñas o aplicaciones sin conexión a la red, y aplicaciones no eléctricas). Sin embargo, se espera que la mayor parte de la ampliación nuclear prevista se logre con reactores grandes.

3. Existen diferencias y dinámicas regionales que afectan a cómo se prevé que evolucione la capacidad nuclear tanto en la proyección alta como en la baja. La colaboración internacional es esencial para afrontar los desafíos asociados al desarrollo y el despliegue nucleares, como la armonización de los requisitos reglamentarios y la normalización, y la disposición final de los desechos radiactivos. Otro desafío pendiente es la financiación.

#### Tendencias

4. Existe un interés considerable y creciente en las tecnologías de reactores avanzados e innovadores, entre ellos los SMR y sus aplicaciones. Si bien se prevé que en los próximos decenios el grueso de la nueva capacidad nuclear provenga de reactores avanzados de grandes dimensiones refrigerados por agua, se espera que los SMR desempeñen un papel fundamental para ayudar a descarbonizar sectores en los que esta tarea resulta difícil y suministren energía con bajas emisiones de carbono en mercados donde pueden sustituir a las centrales a base de combustibles fósiles de tamaño similar. El sector nuclear seguirá haciendo frente a diversos desafíos, como las reducciones de costos, la creación de capacidad, y la mejora de la armonización y la normalización en los ámbitos regulador e industrial, a fin de aumentar la competitividad y acelerar el despliegue de la nueva capacidad

nucleoeléctrica. Para apoyar esos esfuerzos de los Estados Miembros, el Director General puso en marcha en 2022 la Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear (NHSI), que ofrece a todas las partes interesadas del ámbito nuclear (gobiernos, reguladores y la industria) una oportunidad única para trabajar de forma sinérgica hacia el objetivo común del despliegue mundial de reactores avanzados tecnológica y físicamente seguros, prestando especial atención a la tecnología de los SMR.

5. Mientras tanto, muchos países que habían decidido eliminar progresivamente el uso de la energía nuclear están volviendo a considerar esta opción y procediendo a una explotación a largo plazo que no había sido planificada.

## A.2. Centrales nucleares en funcionamiento<sup>2</sup>

### Situación

6. A diciembre de 2023, la capacidad nucleoelectrica mundial operativa se situaba en 371,5 GW(e), generados por 413 reactores en 31 Estados Miembros. En 2023 una capacidad adicional de 21,3 GW(e) (25 reactores), con licencia para operar, se encontraba en régimen de suspensión de operaciones. Esto comprende 4 reactores en la India, con una capacidad neta total de 639 MW(e) y 21 reactores en el Japón, con una capacidad neta total de 20 633 MW(e). En el Japón, se volvieron a poner en funcionamiento dos reactores (Takahama- 1 y Takahama- 2) después de que sus operaciones permanecieran suspendidas desde 2011.

7. En 2023 se encontraban en funcionamiento 418 reactores con una capacidad total de 377,6 GW(e), pero solo 403, con una capacidad combinada de 364,48 GW(e), proporcionaron información al Organismo sobre su producción. En 2023 se informó de una producción total de 2515,2 TWh, lo que representa un ligero aumento de un 1 % con respecto a 2022<sup>3</sup>. Los tres productores principales fueron los Estados Unidos de América, que tiene el parque de reactores más grande del mundo y registra un 30 % (742,4 TWh) del total de generación de electricidad, seguidos de China, con un 16 % (406,5 TWh), que sigue generando más electricidad nuclear que Francia por cuatro años y, Francia, con un 13 % (323,8 TWh).

8. En 2023 cinco reactores de agua a presión (PWR), con una capacidad total de 5 GW(e) se conectaron a la red en cinco Estados Miembros. En China, el 10 de enero se conectó a la red el reactor Fangchenggang-3, el primero de los dos reactores de demostración Hualong One (HPR1000) que se están construyendo en el emplazamiento de Fangchenggang. En Eslovaquia el reactor Mochovce-3, un modelo VVER V-213 con una capacidad eléctrica neta de 440 MW(e), se conectó a la red el 31 de enero. En los Estados Unidos de América, el reactor Vogtle-3 AP1000 (1117 MW(e)) se conectó a la red el 31 de marzo. En Belarús, el reactor Belarusian-2 modelo VVER V-491 (1110 MW(e)) se conectó a la red el 13 de mayo. Y, el 21



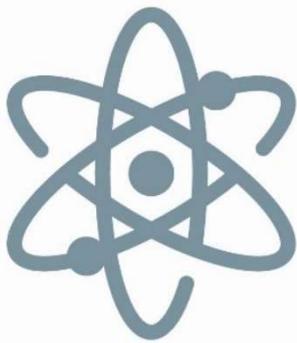
<sup>2</sup> Fuente de los datos: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo ([www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris)), según los datos proporcionados por los Estados Miembros a 16 de junio de 2024.

<sup>3</sup> La producción total de electricidad no incluye las unidades de reactor de Ucrania, ya que en el momento de la publicación no se habían facilitado datos operativos correspondientes a 2023.

de diciembre, se conectó a la red el reactor Shin-Hanul-2 (1340 MW(e)) APR-1400 de la República de Corea. Todos estos reactores, excepto el Mochovce-3 y el Shin-Hanul-2, iniciaron operaciones comerciales en 2023.

9. Al final de 2023, se estaba construyendo una capacidad total de 61,1 GW(e) (59 reactores) en 17 países. Durante el año comenzó en China y Egipto la construcción en seis reactores nucleares de potencia PWR con una capacidad total de 6,8 GW(e). En China, en 2023, se inició la construcción de cuatro

reactores CAP1000 —el Haiyang-4 (1161 MW(e)), el Lianjiang-1 (1224 MW(e)), el Sanmen-4 (1163 MW(e)), el Xudabu-1 (1000 MW(e))— y de una unidad de reactor HPR1000 - Lufeng-6 (1116 MW(e)). En Egipto, el 3 de mayo se inició la construcción del El Dabaa-3 (1100 MW(e)), un reactor VVER-1200.



A finales de 2023 había en construcción una capacidad total de

**61,1 GW(e)**  
**59 reactores**  
en **17 países**

10. Alrededor del 67 % de la capacidad mundial de reactores en funcionamiento (261,8 GW(e), 295 reactores) lleva en funcionamiento más de 30 años, mientras que más del 29 %

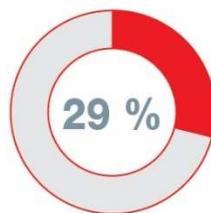
(112,2 GW(e), 142 reactores) lleva funcionando más de 40 años, y el 4 % (17,5 GW(e), 28 reactores), más de 50 años. El envejecimiento del parque de centrales nucleares pone de manifiesto la necesidad de renovar o aumentar la capacidad nuclear operativa a fin de compensar las retiradas de servicio previstas y contribuir a la sostenibilidad y a la seguridad energética mundial, así como a los objetivos relativos al cambio climático. Gobiernos, empresas de servicios públicos y otras partes interesadas están invirtiendo en programas de explotación a largo plazo y de gestión del envejecimiento para un número cada vez mayor de reactores a fin de garantizar una explotación sostenible y una transición expedita a esta nueva capacidad.

**261,8 GW(e)**  
**295 reactores**



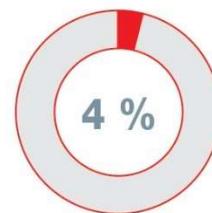
más de 30 años  
en funcionamiento

**112,2 GW(e)**  
**142 reactores**



más de 40 años  
en funcionamiento

**17,5 GW(e)**  
**28 reactores**



más de 50 años  
en funcionamiento

11. Incluso a medida que envejecen las centrales nucleares, los reactores nucleares de potencia que se encuentran en funcionamiento siguen demostrando unos elevados niveles de fiabilidad y rendimiento. El factor de carga, también conocido como factor de capacidad, es la energía producida realmente por un reactor dividida por la energía que podría haber generado si funcionara durante todo el año a su potencia de referencia por unidad. Un factor de carga elevado indica un buen rendimiento operacional. En 2023 el factor de capacidad medio a nivel mundial se situaba en un 87,74 %. Los reactores de agua en ebullición (BWR) y los reactores de agua a presión (PWR) han sido los de mejor rendimiento desde 2013, con factores de capacidad medios del 89,3 % y el 82,7 % respectivamente.

12. A lo largo de 2023 se retiraron de servicio de forma permanente 6 GW(e) de capacidad nuclear (5 reactores). En Bélgica, el Tihange-2 (PWR, 1008 MW(e)) se puso en régimen de parada el 1 de febrero, seguido de la parada del reactor Kuosheng-2 (BWR, 985 MW(e)) en Taiwán (China), el 14 de marzo. Los últimos tres reactores en funcionamiento en Alemania —el Emsland (PWR, 1335 MW(e)), el Isar-2 (PWR, 1410 MW(e)) y el Neckarwestheim-2 (PWR, 1310 MW(e))— fueron puestos en régimen de parada el 15 de abril, doce años después de que el país pusiera en práctica su política de retirada progresiva de la energía nucleoelectrica.

### **Tendencias**

13. Al final de 2023, los 69 años de experiencia operativa acumulada a nivel mundial sumaron más de 19 751 años-reactor, a partir de 647 reactores con una capacidad total de 497,9 GW(e) en 35 países. En el último decenio, la capacidad nucleoelectrica se ha mantenido en un nivel constante y, desde principios de 2013, se han conectado a la red 69,8 GW(e) de capacidad nuclear adicional. Más del 79 % de este crecimiento de la capacidad se dio en Asia donde, durante el mismo período, se conectó a las redes una capacidad total de 55,4 GW(e) (54 reactores). China encabeza el crecimiento en la región, con 40,02 GW(e) de nueva capacidad añadida a la red desde comienzos de 2013.

### **A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansión**

#### **Situación**

14. Actualmente hay unos 50 países interesados en añadir la energía nucleoelectrica a su matriz energética para apoyar el desarrollo socioeconómico nacional. De ellos, 27 se encuentran en distintas fases de la puesta en marcha y la ejecución de su programa nucleoelectrico nacional.

15. Diecisiete se encuentran en la fase de adopción de decisiones: Se trata de países que están considerando la posibilidad de utilizar la energía nucleoelectrica, pese a que todavía no han adoptado ninguna decisión (Argelia, El Salvador, Estonia, Etiopía, Filipinas, Indonesia, Kazajstán, Marruecos, Mongolia, Níger, Senegal, Sri Lanka, Sudán, Tailandia, Túnez, Uganda y Zambia). La mayoría de estos países ya han llevado a cabo estudios preliminares de viabilidad para informar a los responsables de la adopción de decisiones sobre las ventajas de la energía nucleoelectrica y sobre las necesidades y requisitos para que un programa nucleoelectrico tenga buenos resultados. Otros han puesto en marcha su programa y están trabajando en el establecimiento de mecanismos de coordinación nacional y en la elaboración de hojas de ruta para el programa.

16. Diez se encuentran en la fase posterior a la adopción de decisiones: Se trata de países que ya han tomado una decisión y están construyendo la infraestructura, o que han firmado un contrato y comenzarán las obras en un futuro próximo o ya las han comenzado. De estos países, Bangladesh, Egipto y Türkiye ya han comenzado a construir su primera central nuclear. Polonia ha seleccionado la tecnología y firmado un contrato con el proveedor. La Arabia Saudita, Ghana, Jordania, Kenya, Nigeria y Uzbekistán han estado preparando las licitaciones o evaluando las ofertas para su primera central nuclear.

## 27 países en fase de incorporación

### 17 países en la fase de adopción de decisiones

Países que están considerando la posibilidad de utilizar la energía nucleoelectrica, pero que todavía no han adoptado una decisión definitiva al respecto



### 10 países en la fase posterior a la adopción de decisiones

Países que ya han tomado una decisión y están construyendo la infraestructura, o que han firmado un contrato y comenzarán las obras en un futuro próximo o ya las han comenzado



17. En Bangladesh se suministró combustible nuclear no irradiado para las primeras unidades en octubre de 2023, y en Türkiye, en abril de 2023; la explotación comercial de las primeras unidades está prevista para finales de 2024 en Bangladesh y principios de 2025 en Türkiye. En Egipto, el primer vertido de hormigón de la unidad 3 de El-Dabaa (VVER-1200) se llevó a cabo en mayo de 2023. En agosto de 2023, la Autoridad Reguladora Nuclear y Radiológica de Egipto concedió la licencia de construcción para la unidad 4 de El-Dabaa, y se está trabajando en la preparación del emplazamiento para las obras de construcción. En Polonia, finalizó la selección de tecnologías y proveedores para la construcción, para 2042, de PWR con una capacidad total de energía nucleoelectrica instalada de entre 6000 y 9000 MW(e). En la Arabia Saudita, está previsto que la selección del proveedor de tecnología de centrales nucleares finalice en 2025, y que la primera unidad se ponga en servicio en 2036.

18. Al final de 2023 se estaba construyendo, en 17 países, una capacidad total de 61,1 GW(e) (59 reactores), incluidos 6 reactores con una capacidad total de 6,7 GW(e), cuya construcción comenzó en 2023. China comenzó la construcción de cuatro reactores CAP1000 (el Haiyang-4, el Lianjiang-1, el Sanmen-4 y el Xudabu-1) y de la unidad 6 (HPR1000) en la central nuclear de Lufeng, con una capacidad total de 5,7 GW(e). En Hungría ya están en marcha los preparativos para el proyecto Paks II de construcción de dos reactores VVER V-527. El primer vertido de hormigón para el reactor Paks II está previsto para finales de 2024.



*Fig. A.1. El Director General, Rafael Mariano Grossi, se reunió con el Honorable Ministro Yeafesh Osman (Ministerio de Ciencia y Tecnología de Bangladesh) durante una reunión bilateral celebrada en Viena en paralelo a la sexagésima séptima reunión ordinaria de la Conferencia General, el 25 de septiembre de 2023. (Fuente: OIEA)*

19. Jordania prevé publicar en 2026 las especificaciones de la convocatoria de licitación para un proyecto de SMR destinado a la producción de electricidad y la desalación de agua de mar. Ghana amplió su tecnología de reactores para incluir los SMR y está examinando las propuestas de cinco posibles proveedores para el desarrollo de unos 1000 MW(e). La puesta en servicio está prevista en 2029. Kenya ha anunciado que está estudiando la posibilidad de construir un reactor de investigación, así como reactores SMR y centrales nucleares de grandes dimensiones. En Uzbekistán se ha iniciado la caracterización del emplazamiento y concesión de licencias para centrales nucleares con un total de 2400 GW(e) de capacidad instalada. La puesta en servicio de la primera central nuclear está prevista para el período comprendido entre 2026 y 2030.

20. Estonia solo está contemplando la posibilidad de utilizar la tecnología de SMR para su programa nucleoelectrico. En octubre de 2023 se celebró una misión del Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) de Fase 1 para examinar el estado de la infraestructura. En la misión se determinó que el país había evaluado de forma exhaustiva sus necesidades de infraestructura para que el Gobierno pudiera decidir si poner en marcha un programa de energía nucleoelectrica. Durante la misión, el OIEA visitó la sala de información pública de Fermi Energia, en Kunda, que se había creado para mantener

contactos con la comunidad local en torno a uno de los posibles emplazamientos (figura A.2). Está previsto que el Gobierno decida en 2024 si sigue adelante con el programa.



*Fig. A.2. La sala de información pública de Fermi Energia, en Kunda (Estonia), que se utiliza para informar al público sobre el potencial de la energía nuclear, en octubre de 2023. (Fuente: OIEA)*

21. Kazajstán seleccionó un emplazamiento para la construcción de su primera central nuclear y anunció que celebraría un referendo en 2024 para decidir si se seguía adelante con la construcción. Además, en marzo de 2023, Kazajstán recibió una misión de seguimiento del Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) de Fase 1 del OIEA.

### Tendencias

22. Para 2035, el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría aumentar en un 30 %, pues podrían incorporarse a los 31 países actuales entre 10 y 12 países nuevos. Este considerable incremento obliga a intensificar el grado de preparación en términos de infraestructura de esos países, con el apoyo del Organismo, para garantizar un despliegue responsable. La adopción de decisiones o la ejecución de proyectos de construcción de nuevas centrales nucleares también está avanzando en muchos países en fase de ampliación, como la Argentina, Armenia, Bulgaria, Eslovaquia, Hungría, el Pakistán, la República Checa, la República Islámica del Irán y Rumanía. La industria nuclear en varios Estados Miembros también está respaldando el nuevo interés por la energía nuclear en todo el mundo y está desarrollando capacidades adicionales para producir nuevos componentes.

23. El avance tecnológico que capta la atención de los responsables de la planificación energética y los encargados de formular políticas es la disponibilidad y el despliegue previstos de varios diseños novedosos de SMR para 2030. Varios países han incluido los SMR en sus consideraciones

Para **2035**  
el número de países que disponen de  
centrales en funcionamiento  
podría aumentar en un **30 %**  
pues podrían incorporarse a  
los 31 países actuales entre  
**10 y 12** países nuevos.

tecnológicas o siguen haciendo un seguimiento de los avances al respecto; entre ellos figuran países en fase de incorporación como la Arabia Saudita, Estonia, Filipinas, Ghana, Indonesia, Jordania, Kenya, Polonia, el Sudán, Uganda y Zambia, y países en fase de ampliación como Bulgaria, la República Checa, Rumanía y Sudáfrica. El interés de todos ellos obedece a los avances en la tecnología de los SMR y a las posibles ventajas de estos reactores frente a las grandes centrales nucleares, por ejemplo, unos menores costos de capital iniciales, la opción de utilizarlos en redes más pequeñas, las aplicaciones no eléctricas y la posibilidad de ampliarlos mediante módulos.

24. Al mismo tiempo, los Estados Miembros que se inician en el desarrollo de sus programas nucleoelectricos sobre la base de centrales nucleares evolutivas siguen mostrando interés en las tecnologías de las centrales nucleares a gran escala.

25. Con independencia de que un programa se base en centrales nucleares de grandes dimensiones o en SMR, la infraestructura nucleoelectrica nacional, que incluye la seguridad tecnologica nuclear, la seguridad fisica nuclear y las salvaguardias, sigue siendo necesaria y se deberia desarrollar correctamente. Los Estados Miembros continúan notificando que pretenden utilizar diseños de referencia para la explotación y sacar provecho de la experiencia adquirida por los reguladores y explotadores del país de origen.

#### **A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica**

##### **Situación**

26. La atención que se presta en todo el mundo al desarrollo de la tecnología nucleoelectrica está impulsada por la necesidad de acelerar el despliegue de reactores avanzados, incluidos los SMR. Este énfasis no se limita a la generación de electricidad, sino que abarca las aplicaciones no eléctricas, como la calefacción urbana, la producción de hidrógeno y la desalación. Hay partes interesadas no tradicionales que muestran cada vez más interés por aprovechar la energía nucleoelectrica para descarbonizar las actividades industriales que requieren una gran cantidad de energía. El estudio de aplicaciones innovadoras, como las centrales nucleares flotantes para la generación combinada de calor y electricidad, los microrreactores en zonas remotas y las soluciones nucleares para aplicaciones en el espacio ultraterrestre, refleja la dinámica evolución de la tecnología nuclear. Los reactores avanzados, debido a su capacidad de aportar flexibilidad a las redes eléctricas en medio del auge de las energías renovables variables, están ganando terreno. Además, la industria nuclear está incorporando la inteligencia artificial (IA), especialmente las técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, para revolucionar los sistemas operacionales y de mantenimiento mediante potentes capacidades informáticas e instrumentos de análisis de datos.

27. La tecnología nucleoelectrica evoluciona poniendo especial énfasis en el desarrollo de los reactores avanzados y la ampliación de las aplicaciones de estos. Gracias a la investigación y la innovación continuas, la energía nucleoelectrica se está convirtiendo en un recurso fundamental para atender las necesidades energéticas mundiales y, al mismo tiempo, mitigar las emisiones de carbono. Los esfuerzos por integrar la energía nucleoelectrica en sectores no eléctricos son ejemplo de un planteamiento estratégico para potenciar al máximo los diversos beneficios que puede aportar la tecnología nuclear a diferentes facetas del panorama energético mundial. Esta evolución estratégica hace que la energía nucleoelectrica contribuya de manera fundamental a un futuro energético sostenible y con bajas emisiones de carbono.

##### **Tendencias**

28. Los reactores refrigerados por agua (WCR) han sido la tecnología predominante utilizada en las centrales nucleares de todo el mundo. Las tendencias actuales pasan por mejorar las características de seguridad de esos reactores, como los sistemas de refrigeración pasiva para aumentar la fiabilidad

general del sistema, así como los diseños de combustibles con el fin de aumentar su rendimiento y reducir los desechos.

29. Debido a su tamaño compacto y a su potencial de despliegue en zonas remotas o regiones con una infraestructura de red limitada, los SMR se siguen estudiando en profundidad en todo el mundo. La tendencia actual en el desarrollo de los SMR se centra en mejorar sus aspectos económicos, sus características de seguridad y su escalabilidad.

30. En cuanto al desarrollo de la tecnología de los reactores rápidos, las tendencias actuales se basan en mejorar las medidas de seguridad mediante la incorporación de sistemas pasivos de parada y el estudio de diferentes refrigerantes, especialmente en el contexto de los diseños de reactores innovadores. También se hace mucho hincapié en mejorar los aspectos económicos de los reactores rápidos para reducir los costos de construcción e incrementar el rendimiento del combustible.

31. Ha aumentado el interés en las aplicaciones del calor nuclear, por ejemplo, para alimentar plantas de desalación con el fin de hacer frente a los problemas de escasez de agua en muchas regiones; para producir hidrógeno mediante electrólisis a alta temperatura; o en industrias que requieren calor a alta temperatura, como los sectores químico y manufacturero.

#### **A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua**

##### **Situación**

32. Los WCR representan más del 95 % de las centrales nucleares comerciales que están en funcionamiento en el mundo. Con su largo y fructífero historial operacional, contribuyen de manera importante a atender las necesidades energéticas mundiales. Se utilizan ampliamente para generar electricidad debido a su fiabilidad y su rendimiento. La industria nuclear está en constante evolución y se están realizando actividades de investigación y desarrollo (I+D) sobre diseños avanzados, mejoras de seguridad y tecnologías alternativas, como los sistemas energéticos híbridos (energías renovables acopladas a fuentes nucleares), para hacer frente a la creciente demanda de energía y a los desafíos climáticos. Los avances en la ciencia de los materiales, la modelización computacional y la ingeniería de seguridad están impulsando mejoras de las tecnologías de los reactores avanzados refrigerados por agua. Entre ellas cabe mencionar las características y sistemas de seguridad pasiva, las tecnologías de combustibles mejoradas, unos métodos de refrigeración más eficaces, la reducción de los desechos radiactivos y una mayor resistencia a la proliferación. Por ejemplo, en varios países ya hay en funcionamiento o en construcción diseños de PWR avanzados, como el AP1000, el APR1400, el EPR, el HPR1000 y el VVER1200. La tercera unidad del APR1400 del emplazamiento de Barakah, en los Emiratos Árabes Unidos, comenzó a funcionar con fines comerciales en febrero de 2023. En los Estados Unidos de América, en julio de 2023 se inició la explotación comercial de un reactor AP1000 en la Unidad 3 de la central Vogtle. En noviembre de 2023, la unidad de potencia 2 de la central nuclear de Belarús inició operaciones comerciales. En la Federación de Rusia se está desarrollando un reactor VVER-S con regulación espectral. La labor que se está realizando en varios países se centra en seguir desarrollando reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR) conceptuales, lo que comprende el estudio de diseños más pequeños para diversas aplicaciones y la optimización de los SCWR para que funcionen de manera eficaz en regímenes de espectro neutrónico mixto. Se siguen llevando a cabo estudios de caso nacionales sobre el análisis técnico y económico de los sistemas híbridos de energía nuclear y renovable —especialmente solar y eólica, que son fuentes variables de energía— con centrales nucleares avanzadas, para proporcionar carga eléctrica base, mejorar la estabilidad de la red y utilizar el calor nuclear en aplicaciones no eléctricas.



*Fig. A.3. La unidad 3 de la central eléctrica Vogtle (Georgia, EE. UU.) tras su finalización.  
(Fuente: Southern Nuclear Co.)*

## **Tendencias**

33. Hay 55 unidades de WCR en construcción en 17 Estados Miembros, de las cuales 50 son PWR evolutivos avanzados, (variantes ACP (1), AP1000 (1), APR-1400 (3), CAP1000 (6), CAREM (1), EPR (3), HPR1000 (11), PRE KONVOI (1) y VVER (23)); 2 son reactores avanzados de agua en ebullición, y 3 son reactores de agua pesada a presión (PHWR). Estos diseños de reactores ofrecen características de seguridad mejoradas frente a accidentes severos y un mayor ahorro de combustible. La potencia de estas unidades de reactor oscila entre 25 MW(e) y 1630 MW(e) por unidad. La mayoría de estos reactores están ubicados juntos en un mismo emplazamiento.

34. Para responder a los desafíos que plantea el cambio climático y a la demanda de energía, muchos países que explotan la energía nucleoelectrica están trabajando para prolongar al máximo posible la vida operacional de las centrales, inicialmente prevista en 40 años, apostando por modernizarlas y por mejorar los principales componentes y equipos.

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

#### **Situación**

35. A finales de 2023 estaban en funcionamiento dos centrales de demostración de SMR. La central nuclear flotante Akademik Lomonosov, en la Federación de Rusia, que tiene dos reactores KLT-40S de 35 MW(e) cada uno, fue recargada con combustible por primera vez. La central nuclear flotante se explota comercialmente desde mayo de 2020 y suministra calor y electricidad a la ciudad de Pevek, en la región de Chukotka. En China, el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura de demostración del emplazamiento de Shidaowan comenzó a funcionar con fines comerciales el 6 de diciembre de 2023, con una potencia total de 200 MW(e), generada por dos reactores. En 2023, tres centrales de SMR se encontraban en distintas fases de construcción. En la Argentina, la construcción del reactor CAREM 25 apunta a 2028 como nuevo plazo previsto para la conexión a la red. En China, la central de demostración ACP100 de Changjiang (provincia de Hainan) se encuentra en construcción desde julio de 2021. El núcleo del reactor se instaló en agosto de 2023. La unidad del PWR multipropósito, conocida como Linglong One, generará 125 MW(e) de electricidad para 2027. El diseño RITM-200N ha recibido una licencia para el emplazamiento en el distrito Ust-Yansky de Yakutia (Federación de Rusia) y se prevé que, para 2028, generará 55 MW(e) de electricidad. Comenzó la

fabricación de piezas forjadas de varias configuraciones para reactores RITM-200C y para 2027 se construirá en Chukotka (Federación de Rusia) una central nuclear flotante con este reactor.

### **Desarrollo de diseños y concesión de licencias para el despliegue a corto plazo**

36. En el Canadá, está previsto que en 2025 comience en el emplazamiento de Darlington la construcción del reactor BWRX-300 con circulación natural, y su conexión a la red se ha programado para finales de 2028. El diseño del microrreactor modular (MMR) está pensado para una aplicación sin conexión a la red en Chalk River (Ontario). Se está examinando el diseño del proveedor para el ARC-100 y la licencia para preparar un emplazamiento también está en proceso de examen. La primera unidad del ARC-100 se ubicará en el emplazamiento de Point Lepreau, en New Brunswick.

37. En China, el 6 de diciembre de 2023 comenzó a funcionar con fines comerciales el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por gas (HTR-PM) de demostración de Shidao Bay (provincia de Shandong), la primera central nuclear con un reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas. El proyecto de demostración del HTR-PM es fruto de la colaboración entre la Universidad de Tsinghua como responsable técnica, encargada de las actividades de I+D y del diseño de los principales componentes y sistemas; China Huaneng Group Co. como propietaria y operadora de la central; y China National Nuclear Co. (CNNC) como contratista de ingeniería, suministros y construcción (EPC) y fabricante del combustible.



*Fig. A.4. El Director General, Rafael Mariano Grossi, durante su visita al HTR-PM (reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por gas) de demostración de Shidao Bay (provincia de Shandong, China). (Fuente: CAEA)*

38. En Francia, EDF creó una filial al 100 % para el proyecto NUWARD, diseñado para desarrollar dos unidades de PWR que generen un total de 340 MW(e). Entretanto, la convocatoria de proyectos “France 2030” impulsa las actividades relacionadas con los reactores modulares avanzados. En 2023 se seleccionaron ocho proyectos, que se basan en varias tecnologías de reactores de la Generación IV,

como las tecnologías de reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR), reactores de sales fundidas y reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR). En Europa, tres reguladores nucleares de Finlandia, Francia y la República Checa publicaron sus informes sobre la primera fase del examen inicial conjunto del SMR NUWARD y está previsto que otros tres reguladores del Reino de los Países Bajos, Polonia y Suecia ingresen en la segunda fase.

39. En Italia, en septiembre de 2023 el Ministerio de Medio Ambiente y Seguridad Energética puso en marcha la Plataforma Nacional para una Energía Nuclear Sostenible, que congrega a partes interesadas del ámbito nuclear italiano con el objetivo de elaborar un estudio preliminar de viabilidad para el posible despliegue de energía nuclear en el país, teniendo como tecnologías de referencia los SMR, los reactores modulares avanzados y los microrreactores.

40. En el Japón, se están estudiando más de diez diseños de SMR desarrollados por partes interesadas del sector privado. En el Organismo de Energía Atómica del Japón, el reactor experimental de alta temperatura (HTTR), cuya potencia térmica es de 30 MW, está en funcionamiento y se utiliza para la demostración de producción de hidrógeno.

41. La República de Corea cuenta con dos diseños de SMR notables. El primero, denominado “SMART”, es un PWR capaz de generar 100 MW(e). Se ha anunciado una nueva alianza con el Canadá, y se presentará una solicitud de licencia para el posible despliegue de un reactor SMART en los laboratorios de Chalk River (Canadá). El segundo, denominado “Innovative-SMR”, es un PWR integrado diseñado para generar 170 MW(e) que está desarrollando un consorcio nacional.

42. En la Federación de Rusia se han desarrollado al menos 20 diseños de SMR de diferentes líneas de tecnología para centrales nucleares tanto terrestres como marinas con fines de generación de electricidad y de generación combinada de calor y electricidad. Se firmó un acuerdo para la construcción de una unidad de un reactor SHELF-M de 10 MW(e) que suministrará energía eléctrica a las explotaciones mineras de Sovinoye. En 2024 comenzará en Yakutia la construcción del RITM-200N, un SMR refrigerado por agua. Se están desarrollando dos proyectos de reactores refrigerados por agua para centrales de potencia medianas con VVER-600 y VVER-C-600 para reemplazar reactores VVER-440 antiguos en el emplazamiento del reactor de la central nuclear de Kola. El proyecto VVER-C-600 incluye una reglamentación del espectro de neutrones para la compensación de la quema de combustible a fin de posibilitar las operaciones en un ciclo de combustible nuclear cerrado.

43. En el Reino Unido, se seleccionaron cinco diseños de SMR y reactores modulares avanzados para profundizar en su estudio, y los contratos se adjudicarán en el verano de 2024. Se trata del NUWARD, el BWRX-300, el ARC-100, el VOYGR y el AP300. Se inició el examen reglamentario del SMR Rolls Royce de 470 MW(e), un PWR de tipo bucle normalizado.

44. En los Estados Unidos de América se están desarrollando numerosos diseños de SMR. La concesión de licencias para el diseño VOYGR de NuScale, que podría constar de seis módulos que generarían 77 MW(e) cada uno, ha pasado de Idaho Falls a otros posibles usuarios en los Estados Unidos y Europa, incluida Rumanía. Las dos tecnologías de reactor de la Generación IV son el SFR Natrium de TerraPower y el Xe-100, que utiliza la tecnología de HTGR. Otros diseños avanzados son el reactor de alta temperatura refrigerado por sales de fluoruro Kairos Power, el microrreactor eVinci y el Holtec SMR-160. También está en marcha el proyecto Aplicaciones, Investigación, Validación y Evaluación de Microrreactores (MARVEL).

## **Tendencias**

45. A lo largo de 2023 aumentó el interés de los Estados Miembros por las centrales nucleares flotantes y los microrreactores, así como por sus aplicaciones. Se están haciendo importantes esfuerzos industriales y en materia de reglamentación para facilitar el desarrollo de diseños y un despliegue

temprano. La tecnología con mayor nivel de madurez o preparación podría implantarse pronto, en torno a 2030. En 2023 continuaron en el Canadá, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón, el Reino Unido y la República Checa las actividades de desarrollo de la tecnología de un subconjunto de SMR conocidos como microrreactores. Los microrreactores, concebidos para generar un rango inferior de potencia de hasta 20 MW(e), se consideran la solución óptima para cogenerar calor y electricidad en regiones alejadas o islas pequeñas, o para sustituir los generadores diésel. Algunas de las tecnologías adoptadas para los microrreactores son los reactores de alta temperatura, los reactores rápidos y las tuberías de calor.



*Fig. A.5. El Director General, Rafael Mariano Grossi, en la apertura del Simposio Internacional sobre el Despliegue de Centrales Nucleares Flotantes: Ventajas y Desafíos, celebrado en noviembre de 2023 en la Sede del Organismo, en Viena. (Fuente: OIEA)*

46. Actualmente, más países están desarrollando diseños de SMR marinos para centrales nucleares flotantes con aplicaciones tanto en la costa como mar adentro. En Dinamarca, una *start-up* dedicada al diseño de reactores está desarrollando el Compact Molten Salt Reactor (reactor compacto de sales fundidas) para producir 100 MW(e). La República de Corea sigue desarrollando la unidad BANDI-60, una unidad flotante de potencia basada en un PWR para generar 60 MW(e). La Federación de Rusia ha aprobado el diseño RITM-200M para las próximas centrales flotantes. Las centrales nucleares flotantes con SMR están diseñadas para mercados muy concretos, entre los que cabe mencionar el suministro de energía eléctrica y calor a comunidades remotas, la desalación y los sistemas energéticos híbridos mediante la colaboración con industrias marinas y de la construcción naval. Se están analizando y evaluando los aspectos jurídicos, reglamentarios e institucionales de esos conceptos de SMR transportables para facilitar su despliegue.

47. Ante este escenario de avances vertiginosos, la Plataforma del OIEA sobre Reactores Modulares Pequeños y sus Aplicaciones, creada en 2021 por el Director General, coordina las actividades del Organismo en el ámbito de los SMR, actúa como centro de coordinación para que los Estados Miembros y otras partes interesadas soliciten asistencia sobre cuestiones generales relacionadas con los SMR y sus

aplicaciones a través de los canales oficiales y sirve como mecanismo para que el OIEA responda a esas solicitudes. Entre los principales esfuerzos de colaboración realizados en 2023 a través del mecanismo de la Plataforma cabe destacar la misión de expertos para examinar un estudio de viabilidad sobre la desalación con SMR en Jordania y el Simposio Internacional sobre Centrales Nucleares Flotantes.

### A.4.3. Reactores rápidos

#### Situación

48. En diciembre de 2023, cinco SFR estaban en funcionamiento en tres Estados Miembros: tres en la Federación de Rusia, uno en China y uno en la India. En 2023, el reactor ruso BN-800 pasó a carga completa con combustible MOX, lo que marca la primera etapa del cierre del ciclo del combustible nuclear. En la India se encuentra actualmente en fase de puesta en servicio el prototipo de reactor reproductor rápido, un SFR experimental de tamaño industrial con una capacidad de 500 MW(e). Está previsto que se conecte a la red en 2024. China está construyendo dos reactores de demostración CFR-600 idénticos, el primero de los cuales ya está en fase de puesta en servicio. El reactor experimental rápido Joyo reanudará operaciones en 2026 tras haber sido objeto de obras de mejora. La tecnología de refrigeración por metal líquido pesado está atrayendo cada vez más atención, especialmente en la esfera de los SMR de neutrones rápidos. La Federación de Rusia está construyendo un LFR de demostración de 300 MW(e), el BREST-OD-300, mientras que en China, los Estados Unidos de América y el Reino Unido, así como en la Unión Europea, se están desarrollando varios diseños de LFR. De los seis conceptos de reactores innovadores desarrollados por el Foro Internacional de la Generación IV, tres de ellos —los refrigerados por sodio, metal líquido pesado y helio— son sistemas de neutrones rápidos. Otros dos —el de sales fundidas y el reactor supercrítico refrigerado por agua— pueden funcionar bien en el espectro neutrónico rápido o en el moderado.



*Fig. A.6. La Compañía de Combustible TVEL envía combustible a China para la carga del núcleo del primer reactor de neutrones rápidos CFR-600. (Fuente: TVEL)*

#### Tendencias

49. El despliegue a mediano plazo de los sistemas de neutrones rápidos se basa en los SFR como opción principal. Además de los tres SFR que funcionan en el país, la Federación de Rusia está desarrollando el gran reactor BN-1200 de 1200 MW(e) y construyendo el reactor de investigación rápido

multipropósito (MBIR). China trabaja en el desarrollo de un reactor CFR-1000 de la Generación IV de 1 GW(e). TerraPower, empresa con sede en los Estados Unidos, está desarrollando el SFR Natrium, que funciona en combinación con el almacenamiento en sales fundidas. Esta tecnología avanzada puede alcanzar una potencia máxima de 500 MW(e), lo que la convierte en un sustituto potencial de las centrales eléctricas de carbón típicas, y puede integrarse con otras fuentes de energía renovables. Otro proyecto estadounidense de SFR, el reactor de ensayo versátil, está pendiente de aprobación por el Congreso de los Estados Unidos. En Francia, entre los 15 proyectos incluidos en la convocatoria de proyectos “France 2030”, se seleccionaron siete empresas para desarrollar SMR de neutrones rápidos en 2023. Ese mismo año se iniciaron cuatro proyectos secundarios de SMR de neutrones rápidos. Aunque los SFR siguen siendo la tecnología más madura, varios países están construyendo y desarrollando LFR, como el BREST-300, actualmente en construcción en la Federación de Rusia y cuya puesta en servicio está prevista para 2028. Además, también están en desarrollo el LFR de Westinghouse de 450 MW(e) de los Estados Unidos de América y el Reino Unido; el Reactor Rápido Avanzado Europeo de Demostración Refrigerado por Plomo de Italia y Rumanía; y varios diseños de LFR de tipo SMR en China y en Francia. Algunas *start-up* trabajan en el desarrollo del SEALER de 55 MW(e) en Suecia, así como el LFR-AS-30 (30 MW(e)) en Francia y el LFR-AS-200 (200 MW(e)) en el Reino Unido, y también se están realizando actividades de investigación y desarrollo en Italia. En los Estados Unidos y la Unión Europea se están desarrollando otras tecnologías de reactores de espectro de neutrones rápidos, como los reactores rápidos refrigerados por gas y los reactores rápidos de sales fundidas.

#### **A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrónica**

##### **Situación**

50. El uso de la energía nuclear para aplicaciones no eléctricas, como la calefacción urbana, la desalación y el suministro directo de calor para diversos procesos industriales, es una tecnología consolidada: actualmente hay unos 70 reactores en funcionamiento en varios Estados Miembros y muchos otros están cada vez más interesados en esta opción.

51. En 2023, 45 reactores nucleares de potencia de diez Estados Miembros suministraron 2046,0 GWh de equivalente eléctrico de calor para aplicaciones no eléctricas. La mayor parte de ese calor (88 %) se utilizó para la calefacción urbana, lo que totalizó 1799,1 GWh en Rusia, China, Eslovaquia, la República Checa, Suiza, Rumanía, Hungría y Bulgaria. La calefacción industrial en la India y en Suiza estuvo respaldada por 211,8 GWh (10 %), mientras que 35,1 GWh (2 %) se utilizaron para actividades de desalación.

52. China ha puesto en marcha recientemente un importante programa para implantar la calefacción urbana mediante energía nuclear a gran escala, sumándose así al grupo de usuarios actuales, entre los que figuran Bulgaria, Eslovaquia, la Federación de Rusia, Hungría, la República Checa, Rumanía, Suiza y Ucrania. China dio inicio al proyecto Hongyanhe en 2022, tras poner en marcha en 2021 un proyecto de demostración de calefacción urbana en la central nuclear de Qinshan, en la provincia de Zhejiang. Además, otros países que ya cuentan con amplias redes de calefacción urbana, como Finlandia y Polonia, están estudiando la posibilidad de utilizar calor nuclear para reabastecer esas redes con energía nuclear, de emisiones cero.

53. La desalación nuclear atrae cada vez más el interés de los Estados Miembros, pues el uso de la desalación está aumentando rápidamente en todo el mundo, con el fin de proporcionar acceso al agua limpia, algo esencial, a una parte cada vez mayor de la población mundial. La India tiene previsto ampliar considerablemente su capacidad de desalación nuclear, para lo que planea instalar en Kalpakkam dos unidades de destilación por múltiple efecto, alimentadas con calor nuclear, que pueden procesar 1000 metros cúbicos por día. Otros países (los Estados Unidos de América y el Japón) utilizan

la electricidad nuclear con el fin de hacer funcionar unidades de ósmosis inversa para la desalación, mientras que Kazajistán y el Pakistán tienen experiencia con la desalación nuclear térmica, y China tiene previsto instalar unidades de ósmosis inversa alimentadas con energía nuclear.

54. Varios Estados Miembros han manifestado interés en producir hidrógeno mediante energía nuclear, entre ellos el Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea y Suecia. En los Estados Unidos, la central nuclear Nine Mile Point empezó a producir hidrógeno en 2023 mediante electrólisis a baja temperatura, sumándose así a la central nuclear de Oskarshamn, en Suecia, que inició la producción comercial de hidrógeno en 2022. Además, tanto los Estados Unidos de América (central nuclear de Prairie Island) como el Reino Unido (central nuclear de Heysham) se encuentran en la fase de desarrollo de proyectos para conectar las centrales nucleares existentes a electrolizadores de alta temperatura, que utilizarán el vapor extraído de los circuitos secundarios de las centrales para aumentar la eficiencia de la producción de hidrógeno. En la Federación de Rusia, Rosenergoatom está realizando una evaluación del impacto ambiental de un proyecto de construcción de un complejo experimental para la producción de hidrógeno en la central nuclear de Kola. Están en fase de desarrollo otros proyectos de acoplamiento de reactores nucleares con electrolizadores de baja temperatura, algunos de ellos en los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia y Francia.



*Fig. A.7. El Centro de Energía Limpia de Nine Mile Point inició la producción nuclear de hidrógeno con fines comerciales en 2023. (Fuente: Constellation)*

## **Tendencias**

55. La energía nuclear es única entre las diversas fuentes de energía bajas en carbono por su capacidad de suministrar tanto calor como electricidad ininterrumpidamente, a gran escala, sin limitaciones geográficas y de forma fiable y distribuida. Esta combinación singular de ventajas está despertando un creciente interés en el potencial de la energía nuclear para ayudar a descarbonizar no solo el sector eléctrico, sino también otras aplicaciones energéticas que, al ser alimentadas actualmente con combustibles fósiles, generan la mayor parte de las emisiones de carbono en todo el mundo. Entre esos sectores figuran la calefacción, el transporte y diversas aplicaciones industriales, desde la producción de cemento y de petróleo y gas hasta la fabricación de hierro, pasando por la producción de fertilizantes y una gran cantidad de otros productos químicos. La energía nuclear puede proporcionar electricidad sin

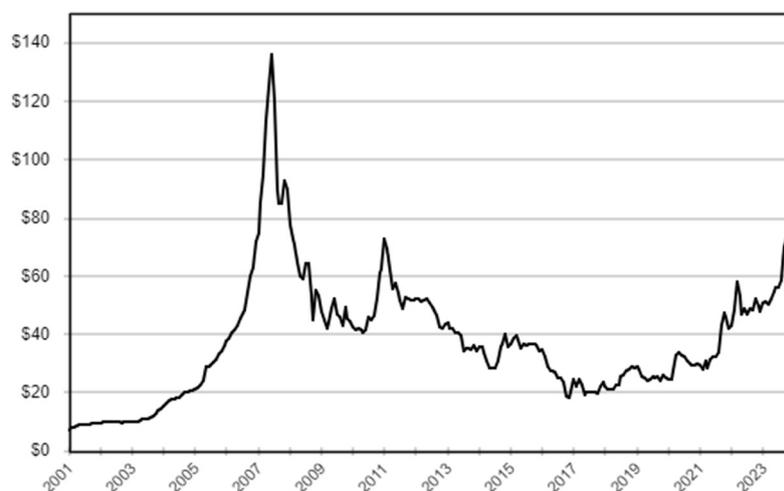
emisiones de carbono cuando la electrificación sea práctica, suministrar directamente calor sin emisiones de carbono para sustituir la quema de combustibles fósiles y suministrar energía descarbonizada para la producción de hidrógeno, que los Estados Miembros consideran cada vez más un elemento clave para lograr una economía con bajas emisiones de carbono. Estas aplicaciones son cada vez más atractivas, ahora que muchas regiones del mundo registran unos costos históricamente elevados de los combustibles fósiles, la preocupación por la seguridad del abastecimiento energético cobra importancia en todo el mundo y los Estados Miembros están redoblando sus esfuerzos para luchar contra el cambio climático.

## B. Ciclo del combustible nuclear

### B.1. Parte inicial

#### Estado

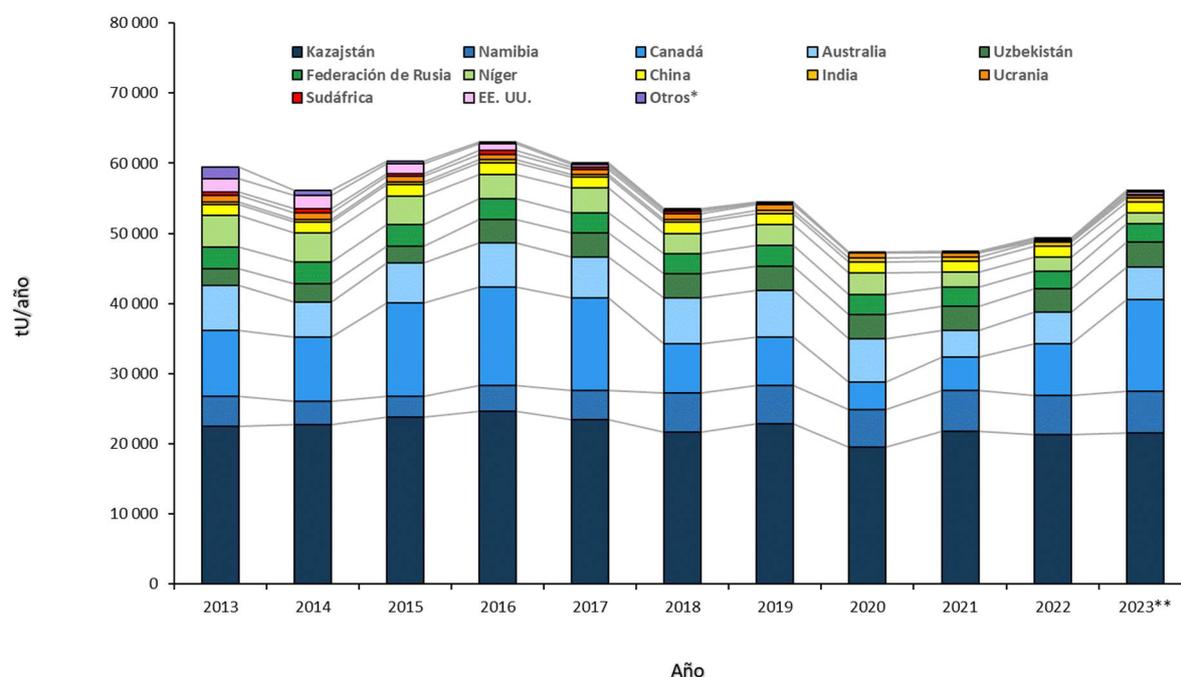
56. A 30 de octubre de 2023, el precio al contado del uranio (U) era de 74,00 dólares de los Estados Unidos por libra de  $U_3O_8$  (192,38 dólares de los Estados Unidos por kg de U), el más alto en 16 años. Esto representa un cambio notable con respecto al precio del mercado relativamente invariable de 2016-2021, que rondaba entre los 20,00 y los 30,00 dólares de los Estados Unidos por libra de  $U_3O_8$  (entre 52,00 y 78,00 dólares de los Estados Unidos por kg de U), y equivale a un aumento de aproximadamente un 200 %.



*Fig. B.1. Evolución del precio al contado del uranio entre 2001 y 2023 (hasta octubre de 2023; fuente de los datos: UxC)*

57. En la publicación conjunta de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN de la OCDE) y el OIEA titulada *Uranium 2022: Resources, Production and Demand* (Libro Rojo 2022), que abarca los años 2019 y 2020, se informa que la producción mundial de las minas de uranio cayó un 13 %, de 54 478 toneladas de uranio (t U) a 47 342 t U. Grandes países productores, entre los que se encuentran el Canadá y Kazajstán, limitaron la producción total en los últimos años en respuesta a la depresión sostenida del mercado del uranio que comenzó antes de 2021 y se extendió hasta mediados de ese año. Además, entre 2020 y 2021, los recortes de la producción de uranio se agravaron inesperadamente debido a la pandemia mundial de COVID-19.

58. En el Libro Rojo 2022 se informa que, a 1 de enero de 2021, la capacidad de producción total de las minas ociosas se cifraba en 29 410 t U adicionales por año y estaban disponibles al menos 335 000 toneladas de recursos de uranio recuperable en el suelo. Estas operaciones, que cuentan con todas las licencias, permisos y acuerdos necesarios para la explotación y tienen experiencia de producción comercial, podrían volver a la producción con relativa rapidez (en un período de uno o dos años). Los datos preliminares para el Libro Rojo 2024, no obstante, indican que la producción de uranio ha repuntado, ascendiendo ligeramente a 47 504 t U en 2021, a 49 336 t U en 2022 y en 2023 a 56 143 t U, que fue el promedio durante el decenio anterior a la pandemia de COVID-19. Se estima que, en 2023, los cuatro países con las tasas anuales de producción de uranio más altas —Australia, el Canadá, Kazajstán y Namibia— aumentaron la producción alrededor de un 2 %, un 76 %, un 1 % y un 7 %, respectivamente, frente a las tasas de producción de 2022.



\* “Otros” comprende los pequeños productores restantes.

\*\* Estimación de la AEN de la OCDE y el OIEA.

*Fig. B.2. Evolución de la producción mundial de uranio entre 2013 y 2023.*

59. Los recursos convencionales de uranio recuperables conocidos a escala mundial (es decir, los recursos razonablemente asegurados y los deducidos en yacimientos de tipo geológico que suelen explotarse) son suficientes para apoyar el crecimiento de la capacidad de generación nuclear a corto y largo plazo. En el Libro Rojo 2022 se informa que más de 6 millones de toneladas de recursos de uranio conocidos son recuperables al precio del mercado actual, lo cual, teniendo en cuenta que las necesidades de uranio relacionadas con los reactores a escala mundial para 2020 eran de 60 114 t U, es suficiente para más de 100 años.

60. Históricamente, para cubrir el déficit en el suministro de uranio procedente de fuentes primarias se ha recurrido a fuentes secundarias. Sin embargo, esto ha ido disminuyendo y se prevé que se mantenga esta tendencia a la baja hasta 2040. El reciente precio del mercado al contado del uranio, que muestra una tendencia sostenida al alza, ha revitalizado la industria de la producción de uranio, y unos pocos productores primarios han reanudado las operaciones que se habían suspendido y estaban en régimen de cuidado y mantenimiento debido al prolongado período de bajos precios al contado del uranio. Estas

operaciones comprenden la mina Honeymoon, en Australia, la mina McArthur River y la planta Key Lake, en el Canadá, y la explotación Smith Ranch-Highland, en los Estados Unidos de América, que reanudarán la producción entre 2022 y 2024, así como la mina Langer Heinrich, en Namibia, que, según se prevé, reiniciará sus actividades en 2025.

61. Según el Libro Rojo 2022, en 2021 el gasto a escala mundial en materia de prospección y desarrollo aumentó ligeramente a casi 280 millones de dólares de los Estados Unidos, lo que supone un 10 % de aumento con respecto a 2020. Esto ocurrió tras una disminución de 1880 millones de dólares de los Estados Unidos registrada de 2014 a 2020. Los datos preliminares para el Libro Rojo 2024 indican que es previsible que ese gasto haya seguido incrementándose considerablemente en 2022 y 2023. En este sentido, por ejemplo, NexGen Energy anunció en 2023 el inicio de un programa de prospección ampliada en las inmediaciones del yacimiento Arrow, situado en la cuenca de Athabasca, en el Canadá.

62. El mercado de producción de combustible se caracteriza desde siempre por una fuerte competencia entre fabricantes y proveedores de combustible. En la actualidad, la capacidad de producción de combustible excede las necesidades, tanto a nivel mundial como regional.

63. La producción de combustible nuclear es una tecnología consolidada que ha mejorado constantemente con los años gracias a la automatización y la digitalización del proceso de fabricación, la reducción de la cantidad de desechos generados por la explotación, y la mejora de la protección radiológica de los trabajadores. Paralelamente, en muchos países se han logrado avances en la mejora de los aspectos económicos de los reactores nucleares, incrementando los quemados de combustible y prolongando la duración del ciclo del combustible, y de la fiabilidad operacional de los combustibles nucleares, reduciendo los casos de fallo del combustible.

64. Algunos Estados Miembros tienen previsto aumentar el uso de combustibles basados en uranio y plutonio y de uranio reprocesado en los reactores de agua ligera (LWR) para optimizar el uso de recursos naturales fisibles. Varios Estados Miembros, entre ellos la Federación de Rusia, Francia, la India y el Japón, tienen la intención de utilizar combustibles mixtos de uranio y plutonio en reactores rápidos. Algunos Estados Miembros que explotan PHWR han empezado a reemplazar núcleos basados en uranio natural por núcleos de uranio ligeramente enriquecido con el fin de mejorar la competitividad de sus reactores.

65. Varios Estados Miembros, entre ellos Bélgica, el Canadá, China, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón y la República de Corea, tienen en curso programas de investigación, desarrollo y demostración para utilizar combustibles tolerantes a accidentes en parques actuales de reactores mediante la fabricación de barras de ensayo inicial y conjuntos de ensayo inicial, exámenes durante y tras la irradiación, la evaluación del comportamiento del combustible, la termohidráulica del sistema y el desarrollo y la validación de códigos de accidente severo. Los combustibles tolerantes a accidentes incorporan nuevos materiales, y algunos de sus diseños deberían posibilitar operaciones más prolongadas y más eficaces en los reactores al aumentar el tiempo que transcurre entre paradas de recarga hasta dos años, mejorando así los aspectos económicos de las centrales nucleares. Algunos Estados Miembros están desarrollando tecnologías de fabricación avanzadas, como la fabricación aditiva (por ejemplo, con impresoras tridimensionales), o emplean IA y procesos totalmente automatizados de fabricación de combustible para llevar al mercado combustibles innovadores y dopados.

66. Algunos diseños de SMR utilizarán diseños de combustibles convencionales (similares a los diseños de combustibles poco enriquecidos que se suelen utilizar en reactores a gran escala). Otros desarrolladores de SMR han optado por diseños de combustibles más innovadores, por ejemplo, basados en UPEAC, para obtener ventajas distintas de las que aportan los diseños de combustibles convencionales. Hay en curso actividades de I+D sobre combustibles de dióxido de uranio y combustibles de mezcla de óxidos de uranio y plutonio y combustibles tolerantes a accidentes para SMR

refrigerados por agua ligera o pesada; sobre el combustible cerámico-metálico para SMR refrigerados por agua ligera, flotantes y de tierra firme; sobre combustibles tri-isotrópicos para SMR de alta temperatura refrigerados por gas/sales fundidas/tubería de calor; sobre combustibles metálicos o cerámicos para SMR rápidos refrigerados por metal líquido/gas/tubería de calor, y sobre combustibles de sales fundidas para SMR refrigerados por sales fundidas. Sin embargo, esos diseños necesitarán plantas de fabricación de combustible y cadenas de suministro separadas o completamente nuevas. También serán necesarias la cualificación y la concesión de licencias relacionadas con estos diseños de combustibles innovadores, en especial los que tienen niveles más elevados de enriquecimiento (por ejemplo, el UPE+ y el UPEAC), antes de su despliegue industrial.

## Tendencias

67. Durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático C P 28, 22 países formularon una declaración para promover el ambicioso objetivo de triplicar la capacidad de energía nucleoelectrica para 2050. Según las previsiones mundiales del Libro Rojo 2022, se estima que la demanda de uranio se situará entre 60 960 t U (escenario de baja demanda) y 76 592 t U (escenario de alta demanda) para 2030, y para 2040, entre 63 040 t U (escenario de baja demanda) y 108 272 t U (escenario de alta demanda). No obstante, si aumenta la demanda de uranio debido a la implantación de SMR tal como se indica en el informe de la Asociación Nuclear Mundial titulado *Nuclear Fuel Report: Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023–2040*, las necesidades mundiales de uranio al año podrían variar entre 86 914 t U (escenario de baja demanda) y 184 316 t U (escenario de alta demanda) para 2040.

68. A medida que comiencen sus operaciones, entre 2023 y 2040, hay minas planificadas y potenciales en 19 países que podrían contribuir a una capacidad de producción total nominal a nivel mundial de 77 138 t U por año. Para garantizar el suministro de uranio será preciso que las minas ociosas reanuden sus operaciones y que las minas planificadas y potenciales se hagan realidad, y para descubrir nuevos yacimientos se necesitarán condiciones de mercado favorables sostenidas. Esto cobra especial importancia respecto de la creación de minas de uranio nuevas, proceso que tarda un promedio de 10 a 15 años en completarse, desde el descubrimiento del yacimiento hasta la explotación minera. Asimismo, se necesitará una considerable y oportuna inversión en tecnología de prospección y extracción/procesamiento, comprendidas técnicas de extracción de uranio eficaces en función del costo para explotar yacimientos de tipo no convencional (por ejemplo, uranio extraído de yacimientos de fosfato y lutita negra).

### Previsión del Libro Rojo 2022



69. Entre las innovaciones y los progresos relativamente recientes que pueden hacer que yacimientos de uranio no rentables y marginales lleguen a convertirse en minas productoras se encuentran las actividades de lixiviación *in situ* de uranio en yacimientos asociados a una discordancia, como se demostró en el yacimiento Phoenix en la cuenca de Athabasca, en el Canadá; las actividades de biolixiviación *in situ* en yacimientos de uranio de tipo areniscas, como las llevadas a cabo en el yacimiento 512 de uranio, en China, donde se están realizando experimentos sobre el terreno; la mejora del beneficio del mineral de uranio de baja ley, como se está haciendo en el yacimiento Marenica, de tipo caliche, en Namibia, y el método de extracción de recursos mediante pozos barrenados con acceso desde la superficie, método nuevo, innovador y ampliable que puede facilitar la explotación de yacimientos de mineral de alta ley relativamente reducidos que son demasiado pequeños o demasiado profundos para que resulte rentable la extracción con métodos de minería a cielo abierto o subterránea. Además, las técnicas de lixiviación en pila, que se suelen emplear para extraer metales de otros tipos de yacimientos, se presentan prometedoras para algunas operaciones relacionadas con el uranio.

70. Un conjunto combustible nuclear no es una mercancía fungible, sino un producto complejo que incorpora actividades de diseño, concesión de licencias e I+D, y tiene que cumplir determinadas especificaciones que vienen determinadas por las características físicas del reactor, por la estrategia de gestión del ciclo del combustible y de operación del reactor que siga la empresa en cuestión y por los requisitos de concesión de licencias a nivel nacional o regional. Las novedades en las tecnologías de diseño y fabricación de combustible pueden dividirse en dos grupos principales: combustibles evolutivos o revolucionarios desarrollados para parques de reactores existentes, que pueden ofrecer mejoras en lo que respecta a la seguridad y el comportamiento, así como a los aspectos económicos operacionales y la gestión de desechos, y combustibles evolutivos o revolucionarios desarrollados para reactores avanzados, incluidos los desarrollados para SMR.

71. Algunos Estados Miembros ya tienen previsto desarrollar infraestructuras de concesión de licencias para mediados de la década de 2020 a fin de respaldar la ampliación del quemado y el enriquecimiento de combustible más allá de los límites históricos del 5 %, así como posibilitar la explotación segura y económica en ciclos de 24 meses de los LWR existentes sin modificar físicamente las plantas de fabricación ni los contenedores de transporte (es decir, modificando únicamente los procedimientos de concesión de licencias).

72. Sin embargo, en el próximo decenio, la industria de producción de combustible nuclear experimentará una demanda cada vez mayor, respecto de todos los tipos de combustible nuclear, debido al aumento de los programas de construcción en países con programas establecidos y en países en fase de incorporación, con objetivos ambiciosos de desarrollo de nuevos tipos de combustible, comprendidos los combustibles para SMR y reactores avanzados. Se están estudiando muchos diseños diferentes de combustibles tolerantes a accidentes, lo que se traduce en una amplia variedad de soluciones con distintos niveles de complejidad: algunos diseños de combustibles tolerantes a accidentes son relativamente fáciles de llevar a fabricación utilizando las líneas y las instalaciones de fabricación existentes, mientras que otros requerirán que se establezcan nuevas líneas e instalaciones de fabricación. Los combustibles mejorados tolerantes a accidentes y los diseños de combustible nuclear innovadores necesitarán enriquecimiento por encima del 5 % (para fabricar muchos de los conceptos de combustible nuclear innovadores se necesitará UPE+ y UPEAC). Para desplegar de forma satisfactoria todos los tipos de combustible para los SMR, las tecnologías de producción de combustible deberán consolidarse y pasar de la etapa de I+D a la de industrialización.

73. Para la utilización de combustible de UPE+/UPEAC es crucial desarrollar nuevos bultos para el transporte que cuenten con la certificación para ese tipo de combustible de uranio. En la actualidad se están estudiando programas de UPEAC en América del Norte y la Federación de Rusia. La Corporación Estatal de Energía Atómica rusa Rosatom tiene capacidad tecnológica para producir tanto UPE+ como UPEAC enriquecido hasta el 19,75 % en U 235, en diversas formas. En la mayoría de los países, la

actual infraestructura del ciclo del combustible nuclear está limitada por los reglamentos a un enriquecimiento del 5 % en U 235. No obstante, en el próximo decenio, la demanda de UPEAC puede cambiar de forma bastante significativa debido al despliegue masivo de SMR, pues muchos de estos nuevos diseños de reactores requerirán UPE+ o UPEAC. En los Estados Unidos de América, Centrus Energy emprendió la producción de demostración de UPEAC en octubre de 2023, y ampliará gradualmente la producción a medida que aumente la demanda. URENCO ha anunciado que está dispuesto a suministrar combustible de UPE+ para los mercados internacionales, que está considerando la posibilidad de construir una unidad dedicada a la producción de UPEAC y que firmó un acuerdo de consorcio con Orano para fabricar cilindros para el transporte de combustible de LEU+/UPEAC.

## **B.2. Parte final**

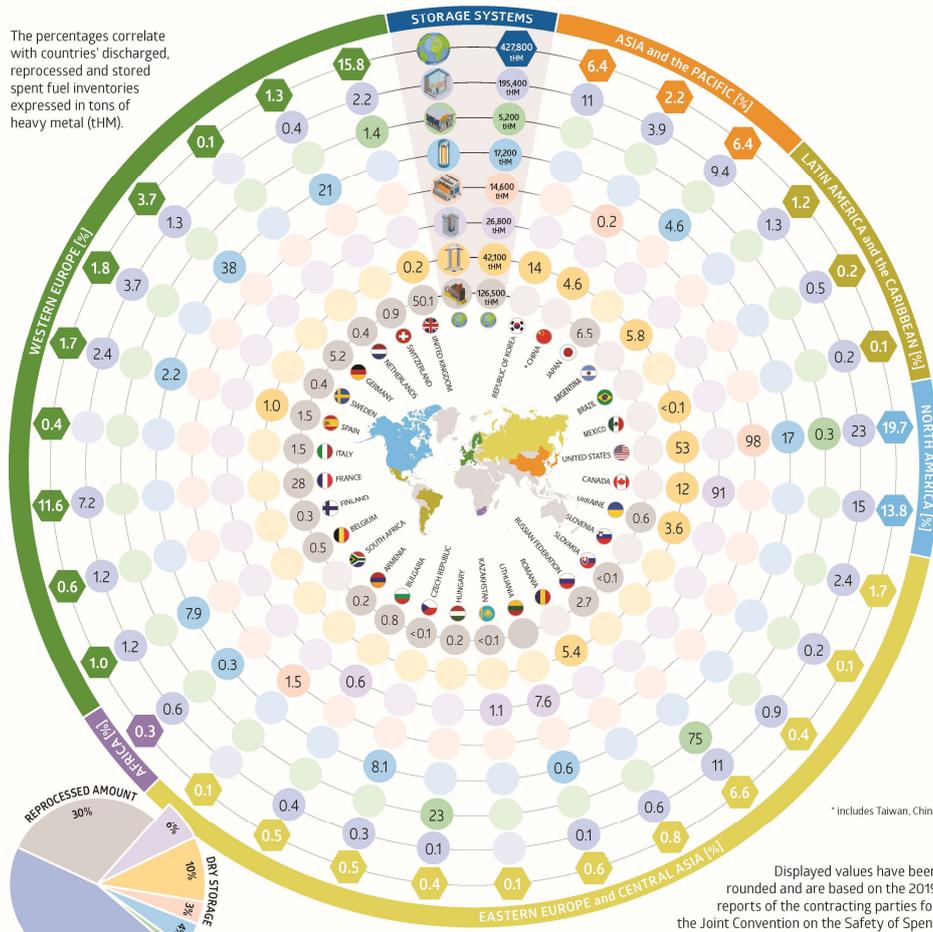
### **Estado**

74. El combustible nuclear gastado almacenado se acumula a un ritmo de aproximadamente 7000 toneladas de metal pesado (t HM) al año en todo el mundo, y las existencias almacenadas superan las 300 000 t HM. Para los países con programas nucleares establecidos desde hace tiempo que siguen estrategias de ciclo abierto, los principales retos siguen siendo la necesidad de capacidad adicional de almacenamiento de combustible nuclear gastado y la duración cada vez mayor del almacenamiento previo a la disposición final. En algunos países, el combustible nuclear gastado se traslada de instalaciones de almacenamiento en húmedo a instalaciones de almacenamiento en seco tras un período de enfriamiento inicial. Han entrado en funcionamiento nuevas instalaciones de almacenamiento en seco (por ejemplo, en la Argentina, Eslovaquia y Eslovenia) y hay otras que está previsto que lo hagan (por ejemplo, en el Japón). El Departamento de Energía de los Estados Unidos ha puesto en marcha una iniciativa para seleccionar los emplazamientos para una o más instalaciones federales consolidadas de almacenamiento provisional según un enfoque basado en el consentimiento de las comunidades afectadas.

# SPENT FUEL MANAGEMENT THE INVENTORY STATUS



The percentages correlate with countries' discharged, reprocessed and stored spent fuel inventories expressed in tons of heavy metal (tHM).



Displayed values have been rounded and are based on the 2019 reports of the contracting parties for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management as well as other publicly available sources.

IAEA International Atomic Energy Agency | NEFW Nuclear Fuel Cycle and Materials Section

Más información



Fig. B.3. Sistemas de almacenamiento de combustible nuclear gastado utilizados en todo el mundo

75. Los Estados Miembros siguen retirando y reubicando su combustible nuclear gastado en el marco de los proyectos de clausura de sus centrales nucleares. Se han desplegado nuevas tecnologías para mejorar las tecnologías de inspección, principalmente las nuevas plataformas robóticas utilizadas para los instrumentos de inspección, de los sistemas de almacenamiento de combustible nuclear gastado. El transporte de combustible nuclear gastado es una operación de rutina en algunos países. En los últimos años, se han desarrollado nuevos bultos para almacenamiento y transporte, se les han concedido licencias y se han puesto en uso para dar cabida a inventarios nuevos o en ampliación.

76. La prolongación de la vida útil de algunas centrales nucleares contribuye al incremento de la cantidad de combustible nuclear gastado que se debe almacenar. Tras el cierre de plantas de reprocesamiento en el Reino Unido disminuyó de forma considerable la capacidad mundial de reprocesamiento. En la Federación de Rusia, Francia, la India y el Japón prosigue el desarrollo a escala comercial de nuevas tecnologías de reciclaje de los combustibles del parque actual y los combustibles para reactores avanzados. El Japón tiene previsto que la Planta de Reprocesamiento de Rokkasho comience a funcionar con fines comerciales en 2024. En los Estados Unidos de América, Oklo ha presentado ante la Comisión Reguladora Nuclear nacional (NRC) un plan que expone sucintamente la colaboración previa a la solicitud para una planta de reprocesamiento a escala comercial. La Federación de Rusia está modernizando las plantas de procesamiento RT-1 y ODC en la Asociación de Producción Mayak a fin de aumentar su capacidad de reprocesamiento de combustible nuclear gastado y mejorar la eficiencia operacional.

### **Tendencias**

77. Sigue siendo fundamental conocer el comportamiento del combustible nuclear gastado en distintos sistemas de almacenamiento, así como los mecanismos de envejecimiento y degradación de las estructuras, sistemas y componentes de almacenamiento, para garantizar que ese combustible se pueda seguir almacenando de forma segura y transportando ulteriormente a las instalaciones de disposición final o a las plantas de reprocesamiento de combustible. A medida que se avanza en los programas de disposición final del combustible gastado y que en algunos Estados Miembros se llega a las etapas finales de construcción, ha aumentado la cantidad de actividades de preparación, como el desarrollo de programas de caracterización. La continuidad de esos esfuerzos es especialmente importante, habida cuenta de que se han logrado mayores eficiencias de los reactores mediante la producción de combustible gastado con grados de enriquecimiento inicial y de quemado más elevados, lo cual ha dado lugar a aumentos de la potencia térmica de salida y riesgos potencialmente más altos de fragilización de la vaina que podrían afectar las etapas posteriores de la gestión del combustible gastado.

78. Se están contemplando nuevos diseños de combustible, tanto para el parque de reactores existente (por ejemplo, combustibles dopados) como para los diseños de reactores avanzados (incluidos los SMR), lo cual podría dar lugar a comportamientos potencialmente diferentes durante la gestión del combustible gastado, por lo que será necesario buscar soluciones innovadoras para la gestión del combustible gastado a fin de que puedan utilizarse en el plazo oportuno. El Organismo coordina las actividades internacionales de investigación sobre este tema para fomentar el intercambio de información y ampliar los conocimientos y la creación de capacidad en los Estados Miembros mediante la recopilación de experiencias operacionales, resultados de investigaciones y enfoques en materia de políticas y estrategia.

79. Pese a que la capacidad mundial de reprocesamiento de combustible gastado ha disminuido en general, cada vez hay más interés por desarrollar tecnologías avanzadas de reciclaje que puedan aplicarse a los combustibles actuales y contribuir al despliegue y la sostenibilidad de los reactores avanzados y los SMR. Es importante integrar los ciclos del combustible nuevos e innovadores con los ciclos del combustible existentes, a fin de afrontar los actuales desafíos en materia de suministro de energía y garantizar la seguridad tecnológica y física y la sostenibilidad del desarrollo de la energía nucleoelectrónica. En algunos países se han empezado a estudiar y elaborar iniciativas para abordar de manera integrada la gestión del combustible gastado y de los desechos radiactivos, mientras que en otros

ya se han puesto en marcha iniciativas de esa índole. El despliegue de nuevos reactores y ciclos del combustible asociados representará un desafío importante, por lo que la colaboración y las alianzas a escala internacional serán primordiales para el éxito.

## C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos

### C.1. Clausura

#### Situación

80. A escala mundial se han retirado permanentemente del servicio 210 reactores nucleares, 23 de los cuales se han clausurado por completo<sup>4</sup>. Estos reactores en régimen de parada están ubicados en 21 países de Europa, Asia y América del Norte. Más de dos tercios de los reactores en régimen de parada, tanto los clausurados como los que se encuentran en proceso de clausura, se concentran en cinco países, a saber, Alemania (33), los Estados Unidos de América (41), Francia (14), el Japón (27) y el Reino Unido (36). Así pues, esos países están llevando a cabo los mayores programas de clausura de reactores de potencia, si bien otros países —como Bulgaria, el Canadá, Eslovaquia, España, la Federación de Rusia, Italia, Lituania, la República de Corea y Suecia—, así como Taiwán (China), también tienen proyectos de clausura de reactores de potencia en curso.



reactores nucleares se han retirado permanentemente del servicio

81. Las principales novedades de 2023 en materia de clausura incluyen la parada definitiva de cinco reactores de potencia en todo el mundo, a saber, los últimos reactores de potencia de Alemania (Emsland, Isar-2 y Neckarwestheim-2), un reactor de potencia en Bélgica (Tihange-2) y un reactor de agua en ebullición (Kuosheng-2) en Taiwán (China). Esta cifra de parada de reactores concuerda con el promedio del último decenio. Los explotadores siguen teniendo un gran interés por prolongar la vida útil de los reactores construidos en la década de 1980 a 60 años o más.

82. Se sigue adquiriendo una experiencia importante de la clausura de los reactores de investigación, de los cuales se han clausurado por completo unos 450 en todo el mundo. Actualmente, se encuentran en proceso de clausura 67.

83. También se están llevando a cabo importantes tareas de clausura en instalaciones del ciclo del combustible en todo el mundo, incluidos varios emplazamientos en los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido.

84. Se lograron importantes avances técnicos en el marco de varios proyectos de clausura en curso, como la finalización de las obras de restauración de Enresa en el emplazamiento de la central nuclear José Cabrera, retirada del servicio. Esta central es la primera en desmantelarse por completo en España (figura C.1).

---

<sup>4</sup> Según la base de datos PRIS ([PRIS - Home \(iaea.org\)](https://www.iaea.org/PRIS)) a 31 de diciembre de 2023, extraído el 6 de junio de 2024.



*Fig. C.1. Antiguo edificio de contención del emplazamiento de la central nuclear José Cabrera.  
(Fuente: Enresa)*

85. Además, en septiembre de 2023, el explotador de la central nuclear de Brennilis obtuvo un decreto del Gobierno francés que autorizaba a finalizar el desmantelamiento de la instalación. El decreto allana el terreno para finalizar las obras de desmantelamiento en el edificio del reactor, la renovación de las estructuras de ingeniería civil, la demolición de los componentes excedentes restantes y la rehabilitación final del emplazamiento.

86. Se lograron importantes avances en el marco del programa de la parte final del ciclo del combustible del Organismo de Energía Atómica del Japón. Por ejemplo, comenzó la segunda fase de la clausura del reactor Monju, un reactor reproductor rápido, que comprende los preparativos para desmantelar el componente relacionado con el sodio (por ejemplo, el blindaje neutrónico) y el componente de generación de electricidad (por ejemplo, la turbina), así como la aprobación de la autoridad reguladora, que se obtuvo en febrero de 2023.

87. En octubre de 2023, Rosenergoatom recibió una licencia del Servicio Federal de Supervisión Ambiental, Industrial y Nuclear por la cual se le confiere el derecho de clausurar las unidades de potencia 1 y 2 de la central nuclear de Novovoronezh. Se prevé que el proyecto culminará en 2035.



*Fig. C.2. Desmantelamiento de un calefactor de agua de alimentación de alta presión como parte de la clausura del reactor Monju. (Fuente: JAEA)*

## **Tendencias**

88. A pesar de la incertidumbre en torno al ritmo al que se llevará a cabo la parada de instalaciones en el futuro, el número de instalaciones sometidas a desmantelamiento activo sigue aumentando y se

observa una tendencia al desmantelamiento temprano de las instalaciones tras la parada definitiva. Entre los factores que influyen en esta tendencia cabe mencionar las políticas gubernamentales, el deseo de los propietarios de las instalaciones de minimizar los costos asociados al mantenimiento de las instalaciones durante largos períodos y la incertidumbre en torno al costo final del desmantelamiento y la gestión de los materiales conexos.

89. Se está haciendo más hincapié en la aplicación de los principios de la economía circular a los proyectos de clausura. La sostenibilidad en la clausura se manifiesta en distintos niveles, como un uso más eficiente de los materiales de clausura con la intención de minimizar los desechos que han de ser objeto de disposición final definitiva y considerar en mayor medida la reutilización/el cambio en la finalidad de uso de emplazamientos o instalaciones para utilizarlos en futuros proyectos industriales. Sin embargo, la economía circular requiere la colaboración entre distintas partes interesadas, desde los responsables de la formulación de políticas y los reguladores hasta las comunidades, quienes tal vez tengan distintas perspectivas y expectativas con respecto a la aceptación de la radiactividad en su vida cotidiana.

90. De cara al futuro, las tecnologías digitales desempeñarán una función cada vez más importante en el fomento de la clausura de instalaciones nucleares. Entre sus importantes beneficios figuran la eficiencia y el uso óptimo de los recursos humanos, económicos y tecnológicos disponibles; la seguridad radiológica para minimizar la exposición del personal; los procesos reguladores y la participación de las partes interesadas para facilitar que se comprendan las actividades de clausura; y la gestión del conocimiento para que la transferencia de conocimientos y experiencias entre el personal actual y el futuro sea eficaz.

91. Otras novedades que están estrechamente asociadas con la creciente adopción de la digitalización son el uso de robots móviles para analizar las condiciones físicas y radiológicas de las estructuras y el uso de herramientas operadas a distancia para el tratamiento de desechos, operaciones de embalaje y operaciones en zonas de difícil acceso, por ejemplo, debido a altas tasas de dosis.

92. Las tecnologías digitales traerán consigo muchos más posibles beneficios a la industria nuclear en su conjunto, y facilitarán considerablemente que la experiencia adquirida de los proyectos de clausura en curso se ponga a disposición de los diseñadores, explotadores y reguladores de instalaciones nucleares, así como de diversas partes interesadas en futuros proyectos de clausura.

## **C.2. Rehabilitación ambiental y gestión del material radiactivo natural (NORM)**

### **Rehabilitación ambiental**

93. Las actividades de rehabilitación ambiental se centran fundamentalmente en cuatro tipos de emplazamientos contaminados, a saber, emplazamientos nucleares (finalmente como parte de un proyecto de clausura); antiguos emplazamientos de extracción y procesamiento de uranio; emplazamientos afectados por accidentes radiológicos; y aquellos en los que se han llevado a cabo operaciones industriales no nucleares que han dejado atrás residuos/desechos que se deben gestionar adecuadamente (por ejemplo, figura C.3).



*Fig. C.3. Almacenamiento provisional de residuos NORM. (Fuente: OIEA)*

94. En 2023 se siguió avanzando de forma constante en la rehabilitación en todo el mundo. En el Reino Unido, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares, inicialmente responsable de la limpieza de los 17 emplazamientos nucleares civiles más antiguos del país, amplió su programa de trabajo para incluir el parque de reactores avanzados refrigerados por gas. En los Estados Unidos de América, 91 de los 107 emplazamientos del país trataron con éxito sus aguas y tierras contaminadas. Se realizó la disposición final permanente de más de 179 000 contenedores de desechos transuránicos. Para finales de 2023 se habían liberado del control reglamentario 6880 hectáreas de terreno. En el estado de Washington, en el reactor B del Sitio de Hanford, que ahora forma parte del Parque Nacional del Proyecto Manhattan junto con el Laboratorio Nacional de Oak Ridge y el Laboratorio Nacional de Los Álamos, se completaron actividades críticas de tratamiento del agua de los tanques y se redujo el riesgo perfeccionando y mejorando las instalaciones. Se siguen llevando a cabo labores de limpieza en 16 emplazamientos, aunque la limpieza en estos emplazamientos restantes es relativamente difícil debido a las singulares características de los desechos radiactivos presentes.

#### **Gestión del material radiactivo natural**

95. Además de los desechos radiactivos, muchos países se enfrentan también a la dificultad que supone hacer frente a grandes cantidades de residuos que contienen niveles variables de radionucleidos de origen natural (NORM) generados por operaciones no nucleares.

96. El fosfoyeso, un producto secundario del sulfato de calcio derivado de la producción de fertilizantes, se genera en grandes cantidades. Dado que su transporte y su almacenamiento a largo plazo conllevan costos de inversión y de explotación, el fosfoyeso se suele dejar en vertederos de desechos a cielo abierto, muchos de los cuales están ubicados en zonas al aire libre. El impacto ambiental negativo de los vertidos de fosfoyeso se suele manifestar en forma de contaminación de las aguas subterráneas, las aguas superficiales y el suelo.

97. El fosfoyeso contiene elementos de tierras raras, hierro, titanio, magnesio, aluminio y manganeso, pero también metales pesados tóxicos. En la Unión Europea, muchos de los elementos que conforman las tierras raras se enumeran como materias primas “esenciales”. El fosfoyeso también se puede utilizar para distintos fines, como en la capa base de las carreteras, lo cual es más barato y, como mínimo, tan eficaz como los materiales que se usan actualmente en dicha capa; como enmienda de los suelos agrícolas, pues proporciona azufre, que es muy necesario para la tierra; a modo de cubierta en vertederos, para acelerar la degradación de los desechos y prolongar la vida útil de los vertederos; como material para fabricar tejas de cerámica; y como material para sustratos marinos, como colector para larvas de ostra. Mediante enfoques similares, los residuos de otras operaciones se pueden revalorizar y los beneficios obtenidos de la venta de esos materiales se pueden reinvertir en la rehabilitación de los emplazamientos contaminados. Este enfoque representa una posible solución, fundamentalmente en el caso de los Estados Miembros de ingreso bajo que, de otra forma, no contarían con los recursos necesarios para rehabilitar esos emplazamientos.

## **Tendencias**

### **Rehabilitación ambiental**

98. A medida que prosiguen en todo el mundo las labores de rehabilitación de emplazamientos contaminados, entre la comunidad de la rehabilitación gana impulso la tendencia consistente en no limitarse a reducir los riesgos y adoptar una perspectiva expansiva de adición de valor, sin poner en riesgo la seguridad. Los principios de la economía circular conllevan prestar especial atención a la revalorización del emplazamiento al término tanto de las operaciones nucleares como de las no nucleares. Las obras de rehabilitación exitosas desempeñarán una función crucial para garantizar que la energía nucleoelectrónica pueda contribuir a aliviar los efectos del cambio climático. En esa dirección, se necesitan soluciones de rehabilitación sostenibles y resilientes que tengan en cuenta procesos de participación activa para la toma de decisiones.

### **Gestión del material radiactivo natural**

99. Muchos países han demostrado de qué manera se pueden minimizar los residuos NORM mediante la adopción de enfoques de la economía circular (por ejemplo, España utilizó el fosfoyeso como enmienda del suelo y el Reino de los Países Bajos utilizó residuos NORM como estabilizadores en vertederos). De los residuos NORM se pueden extraer materiales esenciales y, en estos casos, se necesitan técnicas innovadoras. Principalmente se necesitarán políticas gubernamentales que promuevan la adopción de enfoques de circularidad, respaldadas por reglamentos que habrá que adaptar a un contexto de economía circular.

## **C.3. Gestión de desechos radiactivos**

### **Situación**

100. Durante 2023, varios países lograron importantes avances en la gestión de desechos radiactivos, lo que reafirma su dedicación a la manipulación y la disposición final responsables de los desechos y su compromiso con unas prácticas de gestión de desechos más seguras y más sostenibles.

101. Estados Miembros con decenios de experiencia en la aplicación de soluciones de gestión de desechos han seguido desarrollando algunos de sus principales programas nacionales. Por ejemplo, en enero de 2023, la Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos (Andra) de Francia presentó una solicitud de licencia para construir su instalación de disposición final geológica en el marco del proyecto Cigéo. Además, previendo los desechos que se generarían en el futuro a raíz de la clausura de centrales nucleares, la Andra solicitó un permiso ambiental para aumentar su capacidad de disposición final de desechos de actividad muy baja en su Centro Industrial de Recolección, Almacenamiento y Disposición Final (CIRES). Enresa (España) anunció un aumento significativo, de hasta cuatro veces, de la capacidad de disposición final de desechos de actividad baja en la instalación de disposición final de El Cabril. La Cooperativa Nacional para la Disposición Final de Desechos Radiactivos (Nagra) de Suiza está a la espera de recibir un permiso para realizar investigaciones subterráneas en su emplazamiento recomendado. Otros Estados Miembros, como Alemania, el Japón, el Reino Unido y Ucrania, están trabajando activamente en procesos de selección de emplazamientos.



*FIG. C.4. En su visita oficial a Francia en 2023 el Director General, Rafael Mariano Grossi, visitó la instalación de ANDRA, en Meuse/Haute-Marne, y asistió a una presentación a cargo del Director General de ANDRA, Pierre-Marie Abadie, sobre el proyecto Cigéo de disposición final geológica profunda de desechos radiactivos (Fuente: ANDRA)*

102. En lo que se refiere a las innovaciones en la gestión de desechos radiactivos, las empresas Studsvik (Suecia) y Gesellschaft für Nuklear-Service (Alemania) han suscrito un acuerdo exclusivo para aplicar la tecnología “inDRUM” de Studsvik, una tecnología patentada para el tratamiento de desechos radiactivos complejos. En la Federación de Rusia, la Universidad Politécnica de Tomsk y TVEL están colaborando en un proyecto que utiliza descargas eléctricas para para acelerar la descontaminación del hormigón radiactivo. Este método innovador promete una descontaminación más rápida y más eficiente y, a su vez, minimiza la dispersión de polvo, que se suele asociar con los métodos tradicionales de trituración de hormigón. El Instituto de Física e Ingeniería Eléctrica de la Federación de Rusia desarrolló una tecnología para la oxidación en fase sólida del refrigerante de sodio de los reactores rápidos y una instalación industrial piloto MINERAL 100/150. La Decommissioning Alliance (Reino Unido), una alianza conformada por las empresas Jacobs, Atkins y Westinghouse Electric Company, es pionera en el uso de un enfoque innovador para recuperar de forma segura restos procedentes de piscinas de combustible en un emplazamiento de la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares. Se ha puesto a prueba el instrumento de recuperación de lodos en grandes cantidades (Bulk Sludge Retrieval Tool), que ofrece una solución eficiente y con una buena relación costo-eficacia, similar a una aspiradora industrial.



*Fig. C.5. El Director General, Rafael Mariano Grossi, realiza una visita guiada por el Laboratorio de Contenedores de la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares, que incluyó una visita a los contenedores para el almacenamiento subterráneo profundo de combustible gastado, durante su visita oficial a Suecia de agosto de 2023. (Fuente: OIEA)*

103. Durante el período a que se refiere el informe, varios Estados Miembros con responsabilidades más recientes o a menor escala establecieron capacidad e instalaciones nacionales. Por ejemplo, Belarús está logrando importantes avances en la constitución de una organización para la gestión de desechos radiactivos. El objetivo de este Estado es tener en funcionamiento para 2030 una instalación de almacenamiento a largo plazo y de disposición final, que abarcarían no solo los desechos generados por la central nuclear de Belarús, sino también los de diversos sectores que utilizan fuentes de radiación ionizante. El Reino de los Países Bajos ha empezado a construir el Edificio de Almacenamiento Multifuncional, una nueva instalación para desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, diseñada con una vida útil de al menos 100 años. Zimbabwe ha finalizado la construcción de una instalación nacional de gestión centralizada de desechos radiactivos para la gestión a largo plazo de desechos

radiactivos y fuentes radiactivas selladas en desuso. Se mejoraron las condiciones de seguridad tecnológica y física de las instalaciones nacionales de almacenamiento en Filipinas y la República Bolivariana de Venezuela, aumentando así la capacidad de almacenamiento disponible para el futuro próximo.



*Fig. C.6. La instalación de gestión centralizada de desechos construida recientemente en Zimbabwe. (Fuente: OIEA)*



*Fig. C.7. Mejora de las condiciones de las instalaciones de almacenamiento en Filipinas (izquierda) y la República Bolivariana de Venezuela (derecha). (Fuentes: Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares (izquierda) e Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (derecha))*

104. En julio de 2023, el Organismo de Gestión de Desechos Radiactivos (ARAO) de Eslovenia comenzó a preparar el emplazamiento para la construcción de su instalación de disposición final de desechos de actividad baja e intermedia, estableciendo las principales carreteras de acceso y las conexiones necesarias a los servicios públicos y realizando la monitorización ambiental de referencia. En Australia, en cambio, después de que un órgano representativo de los Propietarios Tradicionales impugnara, por motivos de parcialidad manifiesta, la selección del emplazamiento preferido para una instalación de gestión centralizada de desechos radiactivos, en Australia Meridional, el Gobierno no tiene la intención de seguir adelante con el emplazamiento preferido.



*Fig. C.8. Preparación del emplazamiento para la construcción de una instalación de disposición final de desechos operacionales de centrales nucleares en Eslovenia. (Fuente: ARAO)*

## **Tendencias**

105. La tendencia mundial a adoptar principios y prácticas de gestión integrada de los desechos radiactivos está transformando la industria nuclear. Este enfoque garantiza el uso sostenible de tecnología nuclear optimizando la manipulación de los desechos, desde su generación hasta su disposición final. Requiere coordinación entre los encargados de elaborar políticas y estrategias para abordar diversos desafíos relacionados con la idoneidad de las metas establecidas y seleccionar, posteriormente, las opciones técnicas adecuadas respecto de la integración de la gestión de los desechos radiactivos. La gestión integrada de los desechos racionaliza los procesos, mitiga los riesgos ambientales y promueve una gestión responsable de los desechos radiactivos. La Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares del Canadá ha adoptado una estrategia integrada para gestionar los desechos radiactivos, con excepción del combustible nuclear usado. Este enfoque exhaustivo incluye la disposición final de los desechos de actividad intermedia y los desechos de actividad alta no relacionados con combustible en un repositorio geológico profundo, así como de los desechos de actividad baja en instalaciones de disposición final cerca de la superficie.

106. El interés de los Estados Miembros por desplegar SMR va a transformar el ámbito de la energía nuclear. Sin embargo, los SMR traen consigo un importante desafío con respecto a la gestión de los desechos radiactivos. A medida que los países hacen suya esta tecnología innovadora, se deben adaptar las políticas y estrategias apropiadas de desechos radiactivos para dar cabida a los SMR. Para ello se necesita una inversión sustancial en el procesamiento y el almacenamiento de los desechos y en instalaciones de disposición final, así como en la capacitación de personal cualificado. Para cumplir con las nuevas responsabilidades de gestión de desechos radiactivos, es crucial prever financiación, en particular para instalaciones de disposición final, a fin de garantizar un futuro sostenible para la energía nuclear.

107. Otra tendencia creciente es la adopción de la jerarquía de los desechos radiactivos, que se centra en la prevención, la minimización, el reciclaje y la reutilización de los desechos. Con este enfoque se pretende reducir el volumen de los desechos radiactivos destinados a instalaciones de disposición final, lo que se traduce en la conservación de esas instalaciones como activos valiosos a largo plazo. Una manifestación de esta tendencia es la Instalación Occidental de Clasificación y Reciclaje por una Energía

Limpia (Western Clean-Energy Sorting and Recycling Facility) de la sociedad Ontario Power Generation, que minimiza los desechos de las centrales nucleares y, gracias a ello, reduce las necesidades de almacenamiento y los costos de clausura. Además, la instalación RECUMO de Bélgica, destinada al reciclaje de residuos radiactivos procedentes de la producción de radioisótopos de uso médico y a la recuperación de uranio poco enriquecido (UPE), demuestra una vez más la determinación de reducir los desechos. De forma similar, la instalación de retirada de tritio de la Compañía Hidroeléctrica y Nucleoeléctrica de Corea en Rumanía pone de manifiesto el impulso por limitar la generación de desechos y, a su vez, promueve los conocimientos especializados sobre la gestión del tritio. En el Reino Unido, la empresa Nuclear Waste Services publicó su estrategia de gestión de desechos radiactivos, en la que expresa que aplica los principios de la jerarquía de los desechos. Esta estrategia hace hincapié en reducir los desechos, pues fija un objetivo de reciclaje de los desechos derivados de la clausura del 50 % y pretende reducir los desechos secundarios en aproximadamente un 70 % para 2030.

108. Los científicos nucleares están contemplando de qué modo se puede extraer valor de los desechos, a fin de recuperar radioisótopos para aplicaciones médicas y para la exploración espacial. La Agencia Espacial del Reino Unido y el Laboratorio Nuclear del Reino Unido están investigando baterías espaciales de americio 241. En 2023, se retiraron en total 32 fuentes de actividad alta de Chile y Eslovenia. Además, en el marco de la Iniciativa Mundial de Gestión del Radio 226, se retiraron fuentes de radio en desuso de Tailandia. Se están realizando labores en 17 Estados Miembros, como Croacia, El Salvador, Eslovenia, España, Etiopía, Indonesia y Malasia, con el objetivo de inventariar las fuentes de radio en desuso disponibles para producir radioisótopos para el tratamiento del cáncer.

#### **D. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión para la producción de energía en el futuro**

##### **Situación**

109. En 2023, investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de los Estados Unidos repitieron en al menos tres ocasiones el avance revolucionario de la ignición de la energía de fusión logrado en la Instalación Nacional de Ignición en diciembre de 2022.



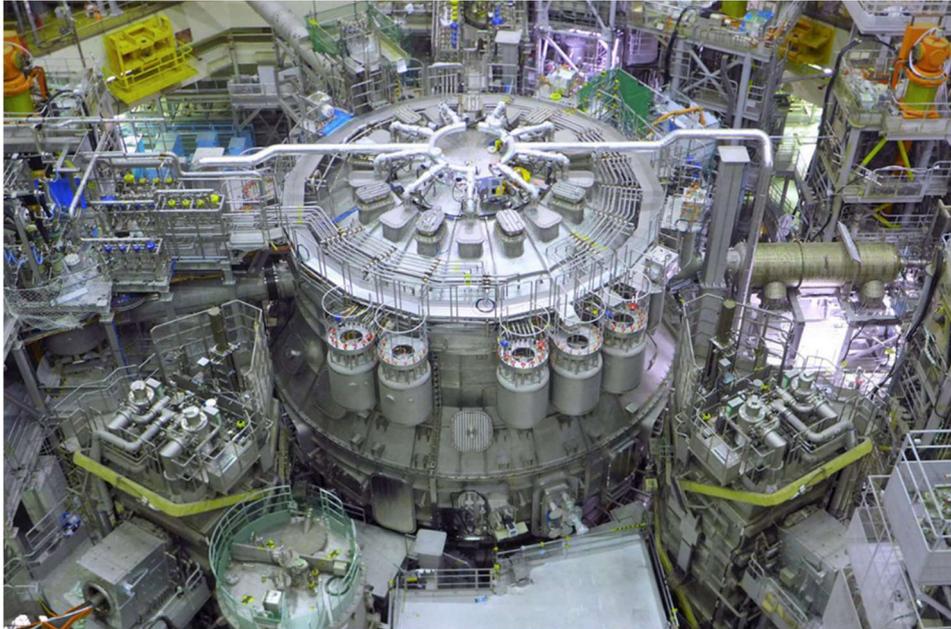
*Fig. D.1. El Director General, Rafael Mariano Grossi, visita la sala del tokamak SPARC.  
(Fuente: OIEA)*

110. En febrero de 2023, la empresa Commonwealth Fusion Systems (CFS) y el Centro de Fusión y Ciencia del Plasma del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el primer centro colaborador del Organismo en el ámbito de la energía de fusión, inauguraron oficialmente el emplazamiento destinado a la construcción del SPARC: un tokamak planificado para generar una ganancia neta de energía científica. Está previsto que el SPARC entre en funcionamiento en 2025 y demuestre una ganancia neta de energía científica de ahí en adelante. La previsión es que su sucesor, el ARC, esté finalizado para 2035 y demuestre la producción de electricidad.



*Fig. D.2. La sala del tokamak SPARC, lista para el montaje de la máquina. (Fuente: CFS)*

111. En octubre de 2023, el tokamak japonés JT-60SA produjo su primer plasma. Esta máquina de cuatro plantas de altura está diseñada para albergar plasma calentado hasta los 200 millones de grados Celsius durante unos 100 segundos, bastante más tiempo que los tokamaks anteriores de grandes dimensiones. Los plasmas del JT-60SA se parecerán mucho a los previstos para el ITER y deberían permitir a los físicos estudiar la estabilidad del plasma y cómo afecta esta a la potencia de salida de fusión en períodos prolongados, lo que proporcionaría lecciones que se pueden aplicar al tokamak de mayores dimensiones. También en el Japón en 2023, se instaló en Rokkasho el prototipo del acelerador lineal IFMIF.



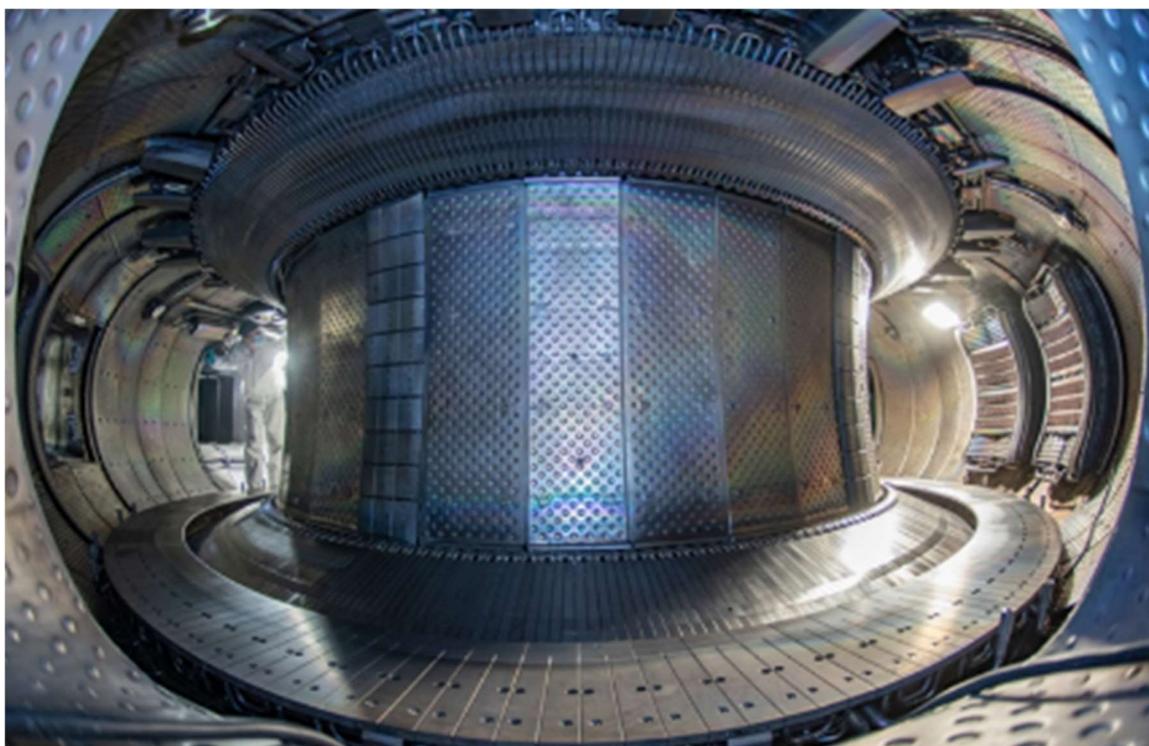
*Fig. D.3. El JT-60SA es el tokamak de mayores dimensiones en funcionamiento, diseñado y construido conjuntamente por el Japón y la Unión Europea. (Fuente: Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas)*



*Fig. D.4. Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA, visita el prototipo del acelerador lineal IFMIF en el Instituto de Fusión de Rokkasho durante su visita oficial al Japón. (Fuente: Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas)*

112. El Tokamak Superconductor Experimental Avanzado (EAST) de China logró una operación prolongada de plasma de alto confinamiento en estado estacionario durante 403 segundos. Con este avance revolucionario se superó el récord original de 101 segundos, alcanzado por el EAST en 2017. La temperatura y la densidad de las partículas se incrementaron de manera considerable durante la operación de plasma de alto confinamiento, lo que aumentará el rendimiento de la generación de electricidad de las futuras centrales de fusión. También en China, el tokamak HL-3 operó por primera vez en modo de alto confinamiento con una corriente plasmática de un millón de amperios, gracias a la mejora de los sistemas de calefacción, operación, control, diagnóstico y suministro de energía eléctrica.

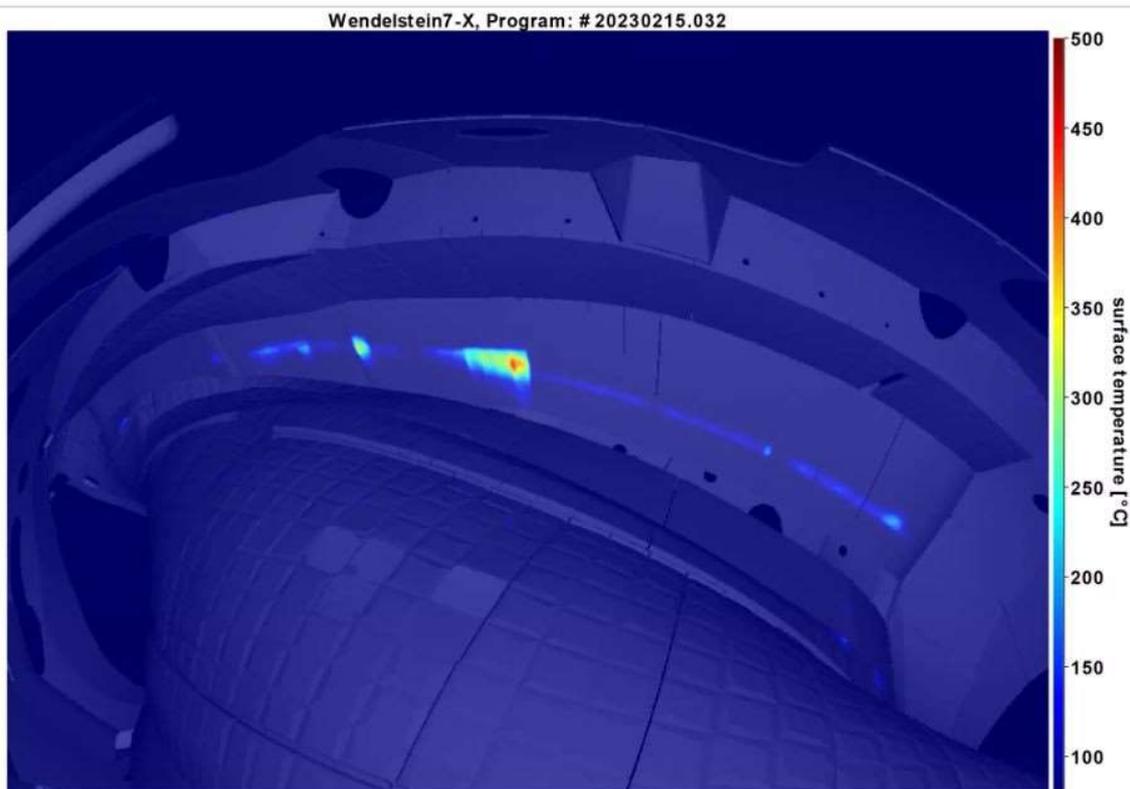
113. En 2023 el tokamak WEST de Francia comenzó a operar su desviador de tungsteno. Se realizó una primera campaña experimental para producir una alta fluencia de neutrones mediante una sucesión de pulsos de plasma de alrededor de un minuto, a fin de demostrar la resistencia y el rendimiento de este nuevo componente.



*FIG. D.5. El tokamak WEST equipado de su desviador de tungsteno activamente refrigerado  
(Fuente: CEA)*

114. Tras 40 años de operación y después de los experimentos finales de deuterio-tritio realizados durante 2023, se ha iniciado la clausura del Toro Europeo Común (JET), que continuará hasta aproximadamente 2040. La clausura del JET proporcionará información valiosa a la comunidad de expertos en fusión, puesto que posibilitará el análisis del modo en que han cambiado los materiales del interior de la vasija durante el tiempo de operación.

115. Investigadores del estelarator Wendelstein 7-X, en Alemania, el más grande del mundo, pudieron lograr una producción de energía de 1,3 gigajulios (GJ). En el futuro, el Wendelstein 7-X pretende lograr una producción de energía de 18 GJ, manteniendo el plasma estable durante media hora.



*Fig. D.6. Imagen infrarroja de la vasija de vacío del Wendelstein 7-X, en la que se puede observar la distribución de la temperatura en las placas deflectoras del divertor, refrigeradas por agua. Se puede ver con claridad una línea definida en el centro, la denominada “strike line”. Es aquí donde el plasma toca el divertor y la temperatura es más alta. En determinadas zonas se alcanzan temperaturas de hasta 600 grados Celsius (zonas rojas). Las baldosas del divertor pueden soportar temperaturas de hasta 1200 grados Celsius.*

*(Fuente: Instituto Max Planck de Física del Plasma)*

116. En 2023, la Organización ITER y sus organismos nacionales siguieron avanzando en el desarrollo de valores de referencia optimizados para el ITER según los cuales se dejaría de usar el berilio como material de la primera pared en favor del tungsteno, lo cual se espera que aumente la resiliencia de los componentes que hay en el interior de la vasija y asimismo minimice la cantidad de tritio retenida en el interior de la máquina. Se ha avanzado en la reparación de los principales componentes así como en las actividades en curso de fabricación, montaje e instalación, mientras que la Organización ITER también siguió trabajando con la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia en la incorporación de un enfoque gradual con respecto a la concesión de licencias que comprende tres fases operacionales experimentales, cada una de las cuales atiende a hitos y requisitos de seguridad concretos a fin de dirigir el proyecto del ITER hacia una culminación exitosa. Los miembros del Consejo hicieron hincapié en el gran valor del ITER y su misión.

117. En Italia, se siguió avanzando en la construcción de la instalación Divertor Tokamak Test (DTT), un nuevo tokamak superconductor destinado al estudio de soluciones avanzadas de divertores para centrales de demostración de la fusión (DEMO). El consorcio que ejecuta el proyecto, conformado por un gran número de instituciones de investigación italianas y asociados internacionales entre los que figura una de las mayores empresas de energía del mundo, ha recaudado casi 500 millones de euros para construir la instalación. La misión principal del DTT es explorar y ensayar la física y la tecnología de conceptos para la descarga de energía del plasma que se podrían utilizar en la central de demostración europea.

118. El objetivo de las centrales DEMO es demostrar una ganancia neta de electricidad a partir de la energía de fusión. Existen al menos 12 conceptos de ese tipo en diversas etapas de desarrollo en China, los Estados

Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea y la Unión Europea, cuyas fechas de conclusión estarían entre 2030 y 2050. Estos conceptos los están desarrollando algunos gobiernos, empresas privadas y algunas empresas conjuntas público-privadas (figura D.4).

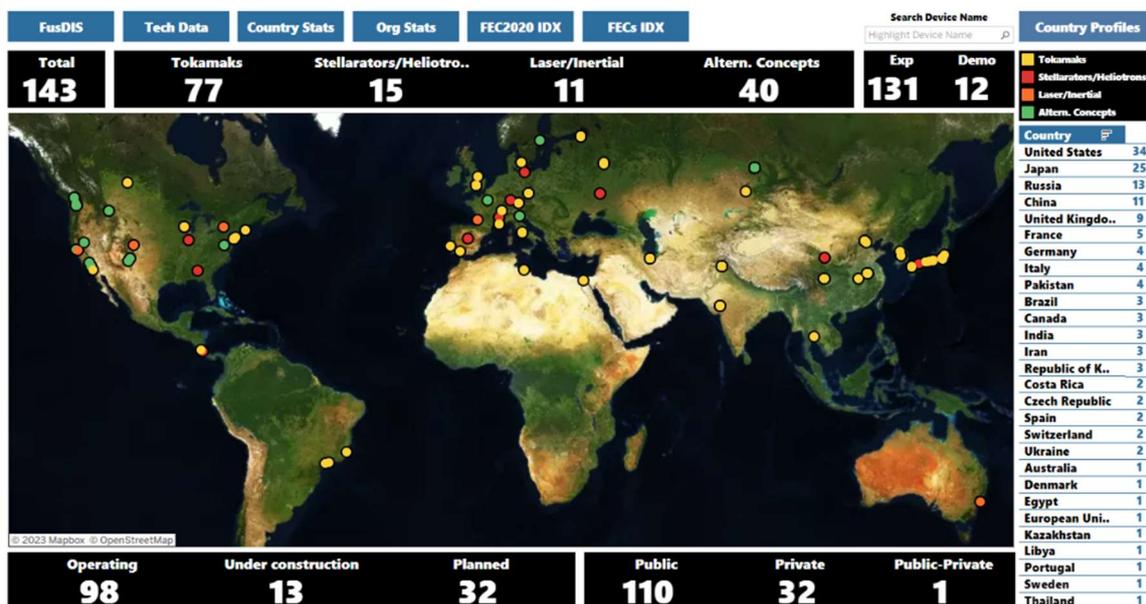
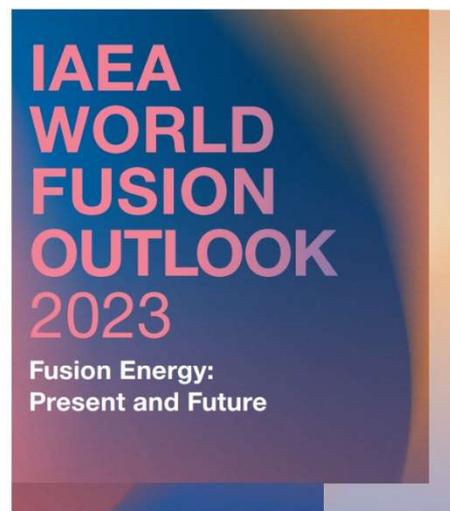


Fig. D.7. Hay más de 140 dispositivos de fusión experimentales, públicos y privados en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación, y varias organizaciones están estudiando diseños de centrales de demostración de la fusión. (Fuente: Sistema de Información de Dispositivos de Fusión del OIEA)

## Tendencias

119. En la 29ª Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión, organizada por el Organismo y el Gobierno del Reino Unido en Londres en octubre del 2023, el Director General presentó el primer número de la publicación *IAEA World Fusion Outlook*, una referencia mundial de información fidedigna y novedades sobre la energía de fusión; también anunció la reunión inaugural del Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión, que tendrá lugar en 2024. Durante la conferencia, el Reino Unido dio a conocer el programa sobre el futuro de la fusión Fusion Futures Programme, en cuyo marco, durante los cinco próximos años, se invertirían 650 millones de libras esterlinas (793 millones de dólares de los Estados Unidos) adicionales en un paquete de programas de I+D, que comprenden la creación de 2200 plazas de capacitación, una nueva instalación de ensayo del ciclo del combustible y financiación para desarrollar infraestructura para empresas privadas de energía de fusión, principalmente en el campus de Culham de la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido (UKAEA). Ese anuncio fue posterior a la decisión del país de abandonar el Programa de Investigación y Formación de Euratom. Pocas semanas después, el Departamento de Seguridad Energética y Emisiones Netas Cero del Reino Unido y el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunciaron una nueva alianza estratégica destinada a acelerar la demostración y la comercialización de la energía de fusión, centrada en promover sus estrategias nacionales en materia de energía de fusión.



Más información:





*Fig. D.8. Ceremonia inaugural de la 29ª Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión, celebrada en Londres. De izquierda a derecha: Andrew Bowie, Subsecretario de Estado Parlamentario (Ministro de Energía Nuclear y Redes) en el Departamento de Seguridad Energética y Emisiones Netas Cero; Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA; e Ian Chapman, Director Ejecutivo de la UKAEA. (Fuente: OIEA)*

120. Mientras tanto, en Alemania, el Ministerio Federal de Educación e Investigación anunció que proporcionaría más de mil millones de euros para la investigación de la fusión de aquí a 2028, además de los 370 millones de euros (396 millones de dólares de los Estados Unidos) ya destinados a instituciones investigadoras para los próximos cinco años.

121. El Japón adoptó su primera estrategia nacional sobre energía de fusión, en la que se pone de manifiesto la necesidad de crear una industrial nacional de la energía de fusión que cuente con una mayor participación del sector privado en las actividades de I+D sobre ese tipo de energía. El Gobierno japonés también anunció que establecería un consejo de la industria de la energía de fusión con miras a desarrollar las industrias conexas, así como para elaborar directrices para la reglamentación de la tecnología de la energía de fusión. Además, el Gobierno dará prioridad a la enseñanza sobre la energía de fusión en el ámbito académico.

122. La Oficina de Ciencias de Energía de Fusión del Departamento de Energía de los Estados Unidos publicó su visión *Building Bridges*, en la que describe tres elementos fundamentales: 1) el desarrollo y el mantenimiento de la fuerza laboral: garantizar la definición de trayectorias sostenibles y resilientes para talentos diversos y excepcionales; 2) el cierre de brechas: crear motores de innovación con laboratorios, universidades y la industria a nivel nacional para subsanar deficiencias en materia de I+D y dar apoyo a las cadenas de suministro nacionales para la energía de fusión, y 3) una ciencia transformacional: fomentar el descubrimiento de la ciencia y la tecnología del plasma y traducirlo en resultados para la innovación. Esta visión forma parte de una estrategia global en materia de fusión que procura favorecer la convergencia de las actividades de los sectores público y privado en materia de investigación y desarrollo de la fusión.

123. Las empresas del sector privado están recibiendo cada vez más atención e inversiones en el ámbito de la energía de fusión, puesto que muchas pretenden desarrollar de forma independiente sus propias

investigaciones y dispositivos de demostración. La empresa privada estadounidense Helion anunció un acuerdo con Microsoft destinado a proporcionar a esta última electricidad de su primera central de fusión, que se prevé que esté en funcionamiento para 2028, con un objetivo de generación de energía de 50 MW. Helion también dio a conocer una colaboración con la empresa Nucor para desarrollar una central de fusión de 500 MW con el fin de proporcionar energía a una instalación siderúrgica de Nucor; el objetivo es que las operaciones empiecen en 2030. En el marco de la convocatoria de proyectos “France 2030” se confió a una empresa el desarrollo de un reactor de fusión estelarator.

124. En el cambiante panorama de la energía de fusión, se están empezando a forjar alianzas público-privadas. En mayo de 2023, el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció que destinaría 46 millones de dólares de los Estados Unidos a ocho empresas para los primeros 18 meses de presentación de diseños y realización de actividades de I+D sobre centrales de fusión, en el marco de su Programa Basado en Hitos para el Desarrollo de la Fusión. Las empresas elegidas estaban entre muchas que enviaron propuestas en las que detallaban sus planes para comercializar la energía de fusión y recibirán financiación de reembolso únicamente cuando hayan alcanzado hitos de comercialización preestablecidos y el Departamento de Energía de los Estados Unidos haya verificado esos logros.

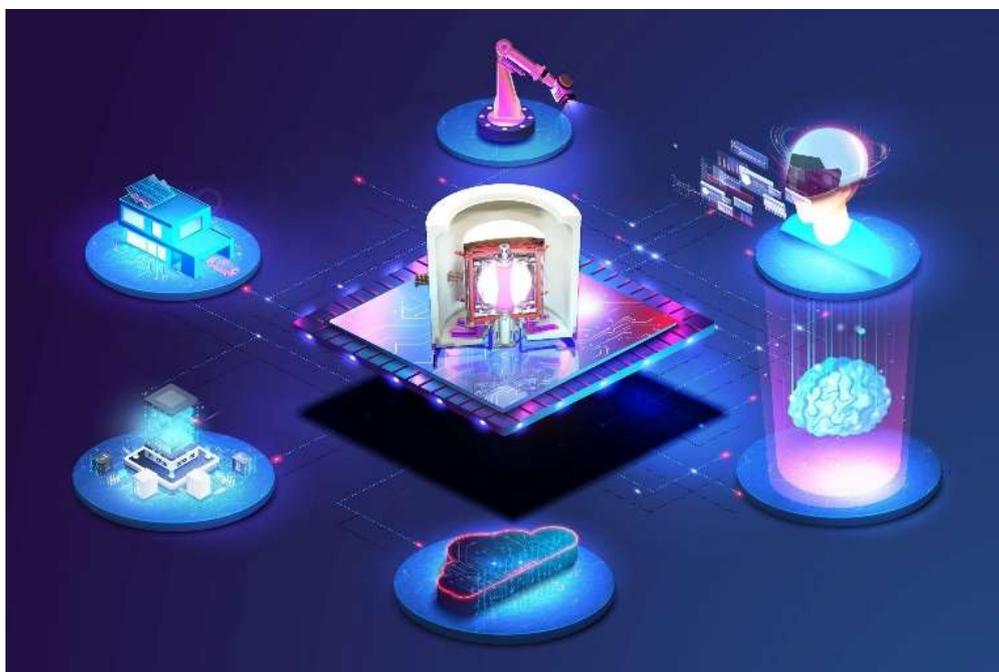
125. En lo relativo a la financiación, la industria de la energía de fusión en general está experimentando aumentos interanuales. El informe anual de la industria de fusión que publica la Fusion Industry Association, titulado *The global fusion industry in 2023* —el tercero que publica esta asociación— señala que la industria de la energía de fusión ha atraído inversiones por un total de 6210 millones de dólares de los Estados Unidos (lo cual supone un aumento con respecto a los 4800 millones de dólares de los Estados Unidos registrados en 2022). En el informe se encuestó a 43 empresas privadas dedicadas a la energía de fusión, desde empresas consolidadas hasta empresas de reciente constitución. Si bien los Estados Unidos de América siguen liderando este ámbito, pues cuentan con 25 empresas de energía de fusión activas (incluidas muchas de las más grandes), la industria está aumentando su diversidad geográfica, pues hay al menos 1 empresa dedicada a la energía de fusión en 12 países.

126. Los órganos reguladores y los legisladores también están empezando a abordar los desafíos y las oportunidades que presenta este tipo de energía. En 2023, California fue el primer estado de los Estados Unidos de América que reconoció la energía de fusión como una tecnología separada y distinta de la energía de fisión. La legislación puso de manifiesto las ventajas ambientales y en materia de seguridad de la energía de fusión y sentó los cimientos para futuros reglamentos estatales. A este hecho le siguió la decisión unánime de la Comisión Reguladora Nuclear de separar el reglamento de la energía de fusión del relativo a la energía de fisión, y de regular los sistemas de energía de fusión a corto plazo en el mismo marco que regula los materiales de subproducto (por ejemplo, los aceleradores de partículas).

127. El Gobierno del Reino Unido confirmó que todas las instalaciones de prototipo de energía de fusión planificadas en el país seguirían siendo reguladas por la Agencia de Medio Ambiente y la Dirección de Sanidad y Seguridad, a diferencia de las centrales nucleares, que son reguladas por la Oficina de Reglamentación Nuclear.

128. Asimismo, el grupo de trabajo sobre energía de fusión de la red Agile Nations, conformado por el Canadá, el Japón y el Reino Unido en calidad de miembros, junto con Bahrein y Singapur en calidad de observadores, elaboró unas recomendaciones conjuntas que reconocen la importante contribución que podría hacer la energía de fusión a los desafíos mundiales del cambio climático y la seguridad energética, así como los beneficios que supondría la adopción por varios países de un enfoque armonizado de la reglamentación de la energía de fusión; y que abogan por la claridad en un marco regulador que se aplicaría a las instalaciones de energía de fusión con independencia de la tecnología de fusión, y que mantenga protecciones adecuadas para las personas y el medio ambiente —proporcionales a los peligros de la energía de fusión—, y que sea, a su vez, transparente y favorezca la innovación.

129. También suscitaron más interés la supercomputación, la IA y el “metaverso industrial”. En 2023 se anunció una colaboración entre la UKAEA, Dell Technologies, Intel y la Universidad de Cambridge. Con ella se pretende explorar la forma en que las supercomputadoras y las tecnologías de IA con capacidades predictivas avanzadas pueden proporcionar un gemelo digital del Tokamak Esférico para la Producción de Energía (STEP): el prototipo de diseño de central de fusión del Reino Unido. Además, el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció que destinaría 29 millones de dólares de los Estados Unidos a siete grupos adjudicatarios para la investigación del aprendizaje automático, la IA y los recursos de datos para las ciencias de la energía de fusión. El Centro de Fusión y Ciencia del Plasma del MIT fue uno de los siete adjudicatarios, y recibió 5 millones de dólares de los Estados Unidos para un proyecto respaldado por el Organismo titulado “Open and FAIR Fusion for Machine Learning Applications”. El proyecto está en consonancia con el acuerdo de centro colaborador del OIEA con el Centro de Fusión y Ciencia del Plasma y con el proyecto coordinado de investigación del Organismo titulado “Inteligencia artificial para acelerar la investigación y el desarrollo de la fusión”, en el cual el Centro de Fusión y Ciencia del Plasma actúa como coordinador técnico.



*Fig. D.9. La supercomputación, la IA y el “metaverso industrial” promoverán el desarrollo del STEP: el prototipo de central de fusión del Reino Unido. (Fuente: UKAEA)*

## **E. Reactores de investigación, aceleradores de partículas e instrumentación nuclear**

### **E.1. Reactores de investigación**

#### **Situación**

130. Al final de 2023 había 234 reactores de investigación en funcionamiento, incluidos los que estaban en régimen de parada temporal, en 54 países. Estos reactores de investigación siguieron generando haces de neutrones, proporcionando servicios de irradiación indispensables para la ciencia, la medicina y la industria, y mejorando los programas de enseñanza y capacitación. En el cuadro E-1 del anexo se indican las aplicaciones más frecuentes de los reactores de investigación.

131. Actualmente menos del 10 % del parque de reactores de investigación del mundo se ocupa de suministrar a la mayor parte del mercado mundial importantes radioisótopos de uso médico, como el tecnecio 99m, el yodo 131, el lutecio 177 o el holmio 166, y de ensayar combustibles nucleares y materiales estructurales para futuros reactores de potencia avanzados ha dado lugar a varios proyectos para establecer nuevos reactores de investigación de alta potencia y multipropósito. Algunos ejemplos son la próxima finalización del reactor de investigación RA-10 en la Argentina y la construcción en curso del reactor de investigación Ki-Jang en la República de Corea, el reactor Jules-Horowitz en Francia, para el cual se aprobó la inversión continua con miras a finalizar su construcción, y el reactor de investigación rápido multipropósito en la Federación de Rusia; el anuncio de que se ha conseguido la financiación y han comenzado los trabajos preparatorios para la construcción del reactor PALLAS en el Reino de los Países Bajos; el compromiso renovado del Gobierno del Brasil con el reactor multipropósito brasileño; y la reciente aprobación por el Gobierno de Sudáfrica de un sustituto del reactor SAFARI-1, construido hace 58 años.

132. En total, se encuentran en construcción 11 nuevos reactores de investigación, incluido 1 sistema accionado por acelerador, en diez países: Arabia Saudita, Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Brasil, China, República de Corea, Federación de Rusia, Francia, República Islámica del Irán y Ucrania. En 2023 entró en funcionamiento en la República Checa una nueva instalación nuclear subcrítica, denominada “VR-2”.





*Fig. E.1 a. En la Argentina, la construcción del reactor de investigación RA-10 está casi terminada. (Fuente: Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina)*



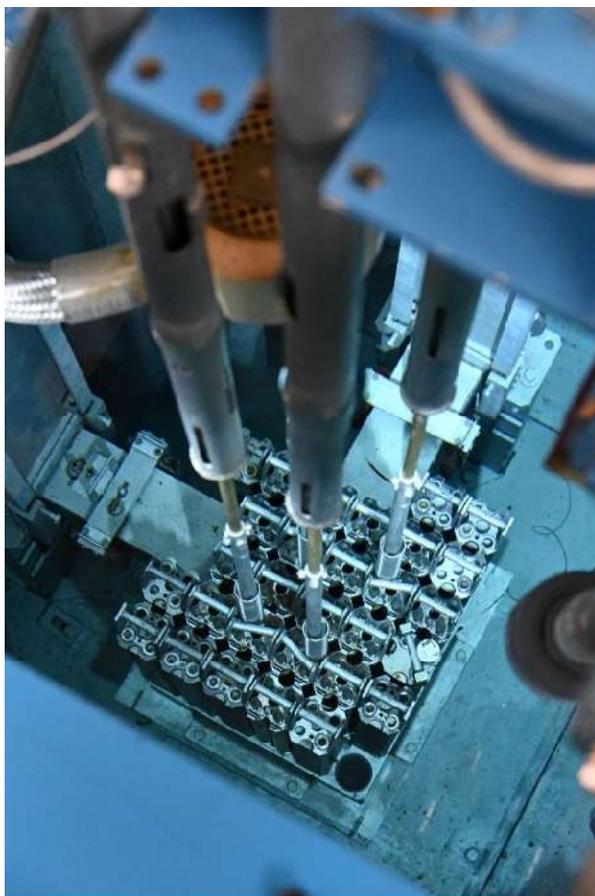
*Fig. E.1 b. La instalación nuclear subcrítica VR-2 empezó a funcionar en la República Checa en 2023. (Fuente: Universidad Técnica Checa)*

133. A finales de 2023, 14 Estados Miembros tenían previsto oficialmente construir nuevos reactores de investigación, a saber: Bangladesh, Belarús, Bélgica, China, Estados Unidos de América, Filipinas, India, Nigeria, el Reino de los Países Bajos, Sudáfrica, Tailandia, Tayikistán, Viet Nam y Zambia. Además, un número importante de países están estudiando la posibilidad de construir reactores de investigación, a saber: Azerbaiyán, Etiopía, Filipinas, India, Iraq, Kenya, Malasia, Mongolia, Myanmar, Níger, República Unida de Tanzania, Rwanda, Senegal, Sudán, Túnez y Uganda.

134. Prosiguieron los esfuerzos internacionales por minimizar el uso de uranio muy enriquecido (UME) en el sector civil. Desde abril de 2023, después de que Bélgica culminara la conversión para utilizar UPE en vez de UME en la producción de molibdeno 99, los principales productores mundiales de este radioisótopo de uso médico tan demandado utilizan métodos de producción sin UME. Hasta la fecha, ascienden en total a 109 los reactores de investigación e instalaciones importantes de producción de isótopos de uso médico que han pasado de utilizar UME a utilizar UPE o que se ha confirmado que están en régimen de parada; y se han repatriado a su país de origen o se han eliminado de otro modo 6925 kilogramos de UME de 48 países (y Taiwán (China)).

### **Tendencias**

135. Los Estados Miembros están utilizando cada vez más sus reactores de investigación en funcionamiento para contribuir a la transición energética y la descarbonización que propugna el ODS 7 (energía asequible y no contaminante). Se utilizan técnicas neutrónicas, como la imagenología neutrónica y el perfilamiento en profundidad por neutrones, para caracterizar celdas de combustible de hidrógeno y baterías de ion litio. Varios reactores de investigación se utilizan para la irradiación y el ensayo de materiales estructurales y combustibles, actividades que son esenciales para el desarrollo de los nuevos conceptos de energía tanto de fisión nuclear como de fusión nuclear y para apoyar el interés renovado por la investigación, el desarrollo y la demostración nucleares que ha surgido en varios países, en particular los Estados Unidos de América. El reactor de radiografía neutrónica (NRAD) del Laboratorio Nacional de Idaho (INL) cuenta con capacidades experimentales únicas para el análisis rutinario de muestras muy radiactivas, lo que permite al personal investigar sobre los combustibles nucleares y materiales estructurales irradiados, contribuyendo así al desarrollo de soluciones innovadoras en el ámbito de la energía nuclear. En 2023, el INL revisó su estrategia a fin de impulsar activamente una mayor utilización del NRAD que ayude a desarrollar soluciones innovadoras en esa esfera.



*Fig. E.2. Vista del núcleo del NRAD con su equipo interno, que se utiliza para la investigación de materiales en el INL. (Fuente: INL)*

136. También se está ampliando la capacidad del reactor de investigación del MIT con objeto de ampliar sus actividades en el ámbito de la irradiación de materiales de interés para la fisión y la fusión nucleares, a fin de complementar la labor del INL y de otras instalaciones de investigación nuclear de los Estados Unidos. El Organismo ayudó a ambas instituciones a llevar a cabo sus proyectos de ampliación por medio de misiones del Examen Integrado de la Utilización de Reactores de Investigación que tuvieron lugar a mediados de 2023.

137. La prueba de las tecnologías de reactores avanzados sigue siendo una de las aplicaciones importantes de los reactores de investigación. La Federación de Rusia se prepara para construir el primer reactor de investigación de sales fundidas de 10 MW del país para demostrar la viabilidad práctica de la tecnología de combustible de sales fundidas y quema de actínidos menores. Se prevé obtener una licencia de construcción en 2027.

138. El envejecimiento progresivo del parque mundial de reactores de investigación ha obligado a los explotadores y reguladores a adoptar nuevas técnicas y metodologías destinadas a evaluar las condiciones de funcionamiento de esos reactores para que sigan funcionando en condiciones de seguridad. Una de esas metodologías es el análisis de envejecimiento en función del tiempo (AEFT), que tiene por objeto evaluar las condiciones de funcionamiento y el tiempo remanente de vida de las estructuras, sistemas y componentes, especialmente de aquellos que conllevan costos de inspección y sustitución elevados y repercuten de manera importante en la disponibilidad operacional del reactor. El AEFT se ha aplicado con éxito para apoyar la explotación a largo plazo de centrales nucleares. Varios explotadores de reactores de investigación ya han comenzado a utilizar el AEFT para respaldar la ampliación de sus licencias de explotación. Debido a las diferencias que existen con los reactores de potencia, la aplicación del AEFT a los reactores de investigación requiere un enfoque graduado adecuado. Actualmente se está contemplando la posibilidad de emprender una iniciativa conjunta para establecer una metodología común, que sea aplicable a todos los Estados Miembros.

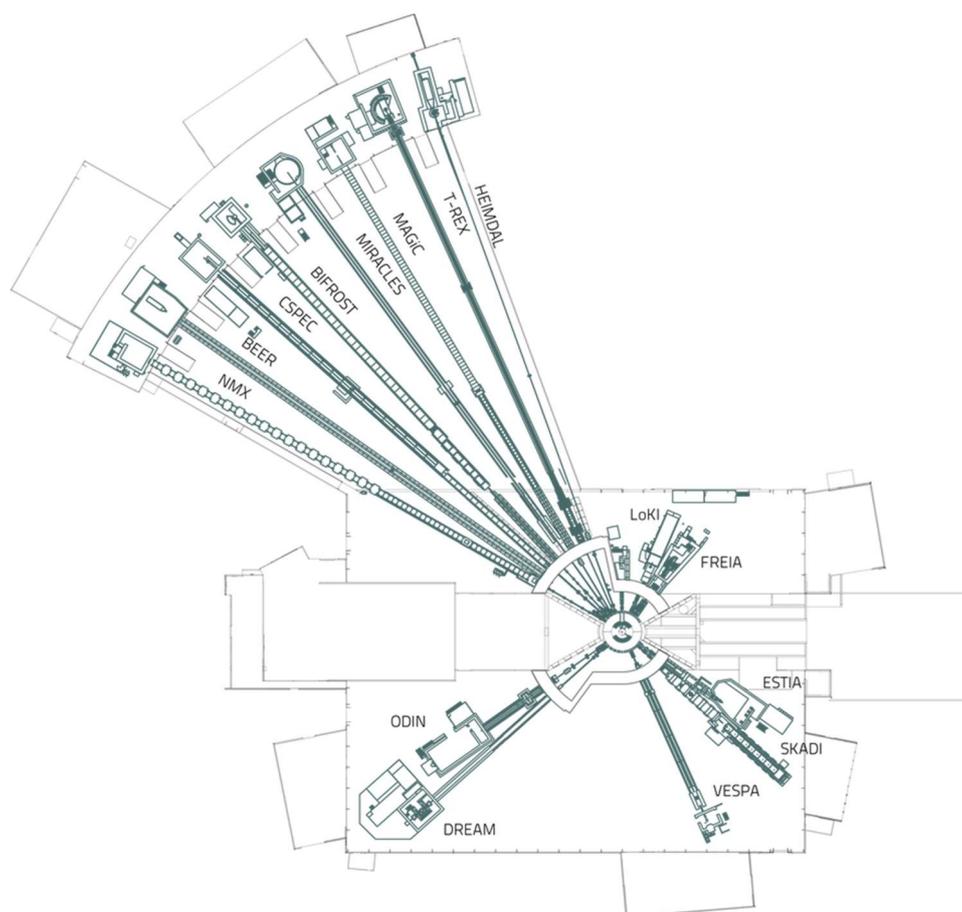
139. Muchos países aprovechan las oportunidades de acceso a reactores de investigación que ofrecen iniciativas de colaboración internacionales y regionales, como la de los Centros Internacionales basados en Reactores de Investigación designados por el OIEA. En la actualidad hay siete centros de ese tipo situados en cuatro continentes; el último centro fue designado en Marruecos, en 2023.

## **E.2. Aceleradores de partículas**

### **Situación**

140. En todos los ámbitos, desde el de los motores hasta el de los medicamentos, pasando por el de los plásticos y el de las proteínas, los estudios científicos detallados dependen del número de neutrones que puede producir y poner a disposición de los investigadores una fuente de neutrones. Por consiguiente, además de los reactores de investigación, los científicos e ingenieros prosiguieron el desarrollo de una nueva generación de fuentes de neutrones basadas en aceleradores de partículas y en la tecnología del blanco de espalación. En 2023, la fase de construcción de la Fuente Europea de Espalación (ESS), uno de los mayores proyectos de infraestructura científica y tecnológica del mundo, progresó a un ritmo constante. Además, en esa instalación, gracias a la colaboración entre Estados Miembros y a numerosas contribuciones en especie, se avanzó de forma considerable en la puesta en servicio del acelerador lineal de protones más potente que se ha construido hasta la fecha, cuyo blanco es una rueda de tungsteno refrigerada por helio, así como de la moderna instrumentación neutrónica conexas. Entre los principales hitos que se alcanzaron recientemente en la ESS se encuentran la finalización de la puesta en servicio del acelerador de protones y la instalación del blindaje permanente para la vasija monolítica del blanco, así como del moderador y del blanco en forma de rueda giratoria productora de neutrones. En paralelo,

se lograron avances considerables en la instalación de las complejas configuraciones experimentales de los 15 instrumentos de dispersión y líneas de haces de neutrones de última generación seleccionados (denominados también estaciones finales para haces de neutrones)<sup>5</sup>.



*Fig. E.3. Conjunto de instrumentos de dispersión neutrónica y espectroscopia de neutrones que ofrecerá la fuente de neutrones de nueva generación basada en acelerador de la ESS. (Fuente: ESS)*

141. A principios de 2023, durante la primera reunión del comité directivo (Steering Committee) de la Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión-DEMO Oriented Neutron Source (IFMIF-DONES)<sup>6</sup>, máximo órgano rector del programa IFMIF-DONES, se anunció oficialmente el inicio de la fase de construcción de la IFMIF-DONES en Escúzar (Granada, España). Se trata de un importante hito en el desarrollo del programa internacional de fusión, que se basa en tres pilares principales: ITER, DEMO e IFMIF-DONES<sup>7</sup>. La instalación, compuesta por un acelerador de última generación, un blanco de litio líquido y un módulo de ensayos de irradiación, proporcionará a DEMO los datos experimentales necesarios en cuanto a capacidades de irradiación y ensayo de materiales en condiciones de irradiación comparables. Mientras avanzaba la construcción de la infraestructura, se realizaron actividades encaminadas a fomentar e impulsar la colaboración en proyectos de investigación, desarrollo e innovación en el ámbito de la fusión y en otros ámbitos científicos y tecnológicos conexos, como la producción de radioisótopos y las mediciones de datos nucleares.

<sup>5</sup> Página web de la instrumentación de la ESS: <https://europeanspallationsource.se/instruments>

<sup>6</sup> [IFMIF-DONES Starts Construction Phase – Fusion Group \(bsc.es\)](https://www.bsc.es/en/ifmif-dones-starts-construction-phase)

<sup>7</sup> Página de presentación de IFMIF-DONES: <https://ifmif-dones.es/es/>

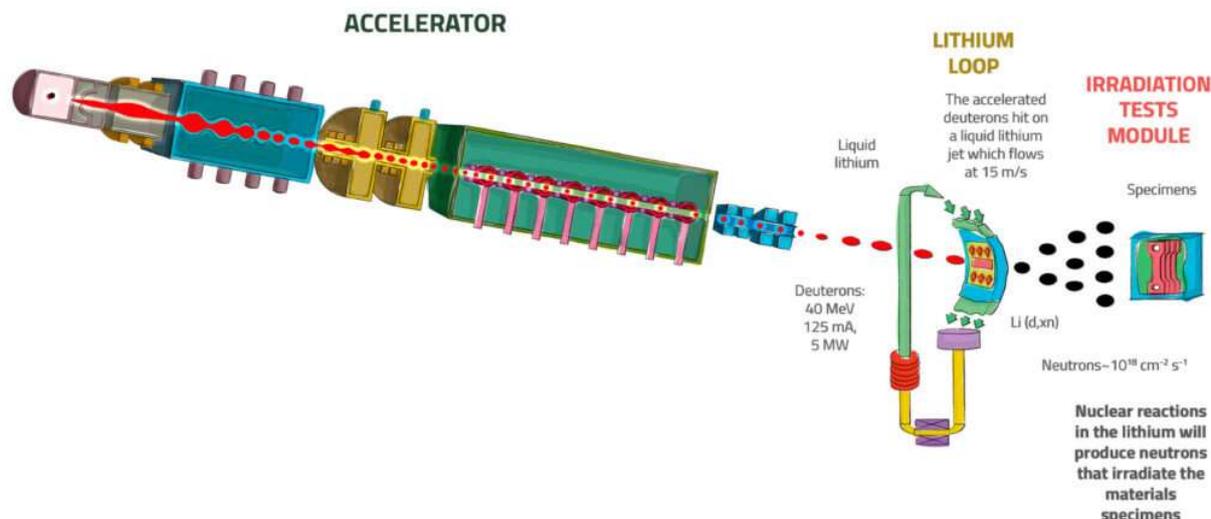
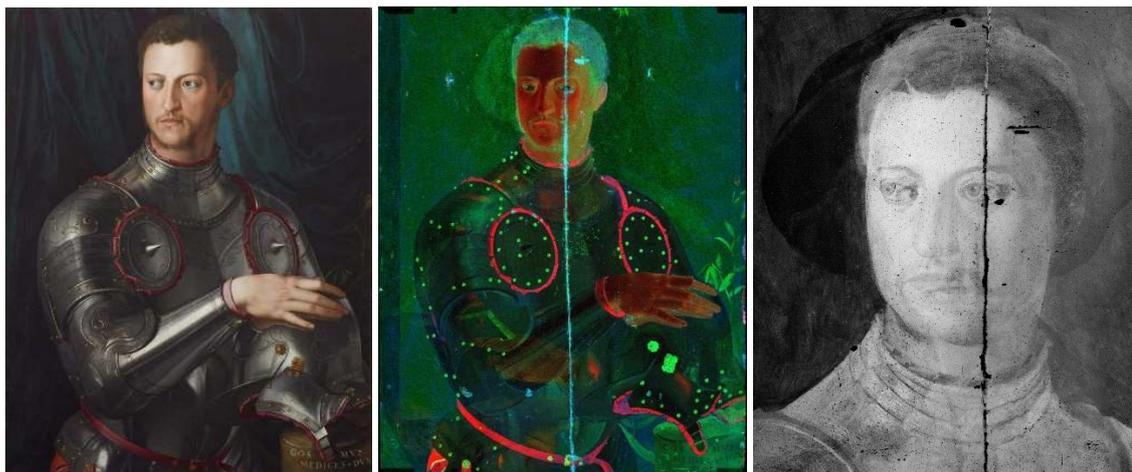


Fig. E.4. Esquema de la instalación IFMIF-DONES, basada en un acelerador de deuterones de alta potencia, un blanco con lazo de litio líquido destinado a la producción de neutrones de alta energía y un módulo de ensayos de irradiación de materiales. (Fuente: IFMIF-DONES)

## Tendencias

142. Los aceleradores de partículas desempeñan un papel fundamental en la imagenología y la irradiación subcelulares para el tratamiento del cáncer. Para el diagnóstico médico se utiliza habitualmente una amplia variedad de técnicas de imagenología, como las ecografías, la tomografía computarizada y la obtención de imágenes por resonancia magnética. El perfeccionamiento de las técnicas de manipulación de haces de iones y rayos X ha permitido enfocar dichos haces a escala nanométrica. Al explorar un objeto con un haz tan fino y combinar esta técnica con diversos sistemas de detección, además de obtenerse información analítica, cobra cada vez más importancia la propia imagen del objeto. La aparición de novedosos métodos de imagenología multispectral ha posibilitado la identificación de pigmentos, el descubrimiento de bocetos ocultos bajo una obra pictórica e incluso la revelación de la estructura interna de pergaminos antiguos. Además, tal y como ocurre en la esfera de la imagenología médica con fines diagnósticos, se están desarrollando sofisticados métodos de procesamiento de imágenes basados en el aprendizaje automático para mejorar la visualización de un objeto, o incluso de los detalles que le faltan.



*Fig. E.5. La imagen de alta definición de un cuadro de Bronzino del s. XVI en el que se representa al Duque Cosme de Médicis (izquierda) obtenida mediante microscopia por fluorescencia de rayos X con el sincrotrón australiano ha revelado un retrato oculto y ha permitido detectar metales en los pigmentos de la pintura y analizarlos de manera no invasiva (derecha). El mapa de distribución elemental del plomo (Pb) muestra claramente la pintura original, por ejemplo, alrededor de la cabeza y el hombro (e indica también el ojo de otra persona debajo). (Fuente: Galería de Arte de Nueva Gales del Sur (izquierda), Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (centro y derecha))*

143. La última tendencia en el ámbito de la imagenología del patrimonio cultural consiste en aplicar la imagenología híbrida combinada con el procesamiento de imágenes. Hay otras similitudes con la imagenología médica, ya que, por ejemplo, tanto los pacientes como los objetos son frágiles y la dosis de radiación administrada, ya sea para la irradiación o el análisis, es fundamental para minimizar los posibles daños por radiación y al mismo tiempo conseguir el máximo efecto de la radioterapia o recopilar información analítica indispensable. Por lo tanto, las aplicaciones médicas son un importante acicate para la investigación científica y tecnológica sobre aceleradores en lo que respecta a la administración exacta y controlable de la dosis de partículas o rayos X<sup>8</sup>. Esas necesidades del sector médico, junto con la imagenología multiespectral, están transformando también las capacidades de la imagenología en el ámbito del patrimonio cultural<sup>9</sup>.

### **E.3. Instrumentación nuclear**

#### **Situación**

144. El despliegue de vehículos terrestres no tripulados, además de mochilas y drones convencionales dotados de instrumentación, ofrece numerosas ventajas en el ámbito de la elaboración de mapas de radiación. Estas plataformas terrestres están disponibles en diversas configuraciones, siendo los robots con ruedas, con patas y con orugas los tipos predominantes. Los vehículos terrestres no tripulados pueden diseñarse específicamente para que soporten altas tasas de dosis, de manera que puedan llevar a cabo tareas como el desmantelamiento y la clausura de instalaciones nucleares. Los robots pueden funcionar de dos modos, bien por control remoto (teledirigidos), o bien de forma autónoma, para lo que emplean sensores apropiados y algoritmos sofisticados. En determinados entornos al aire libre se utiliza la navegación por satélite, aunque predomina la tendencia de usar la localización y la cartografía

<sup>8</sup> Bertrand, L. et al. Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Volume 164 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078>.

<sup>9</sup> Gibson, AP. Medical imaging applied to heritage. *The British Journal of Radiology* 96, No 1152 (2023). <https://doi.org/10.1259/bjr.20230611>.

simultáneas basadas en la detección y localización por ondas luminosas (LIDAR), que también pueden emplearse en interiores. Actualmente, es posible utilizar paquetes de localización disponibles en el mercado para garantizar la navegación autónoma. El conjunto de sensores habitual en este ámbito incluye los sistemas LIDAR, los radares, los sistemas RGB y las cámaras de profundidad y termográficas, así como diversos medidores de tasa de dosis, espectrómetros y otros sistemas de detección de radiaciones. Una tendencia actual es la fusión de datos de escena, técnica que combina múltiples fuentes de datos para complementar con información de contexto las mediciones de la radiación. El procesamiento de datos se puede ejecutar en tiempo real, ya sea mediante computadoras instaladas a bordo o a distancia través de estaciones, en cuyo caso será necesario transmitir los datos pertinentes a estaciones locales de control en tierra o a la nube. Como alternativa, la información se puede recopilar mediante registradores de datos para procesarla *a posteriori*.

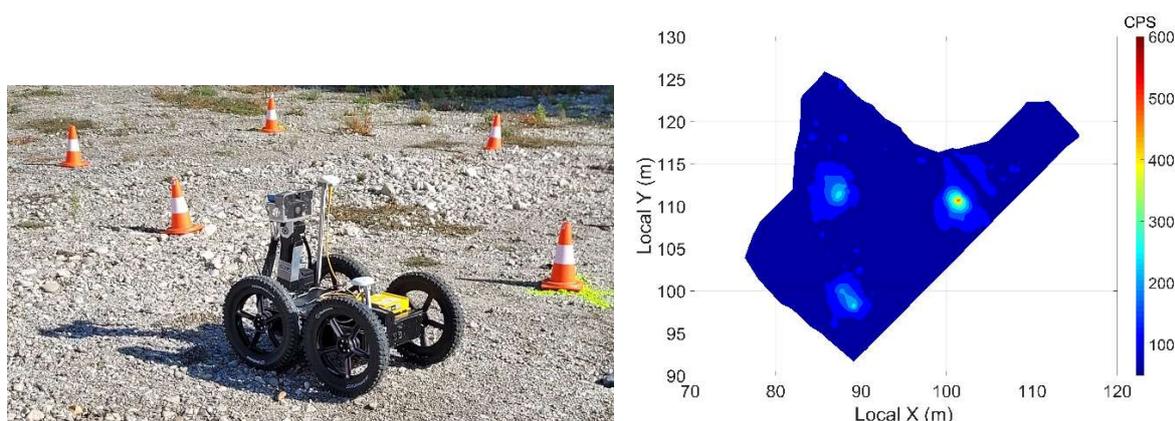


Fig. E.6. Vehículo terrestre no tripulado dotado de instrumentación utilizado en un taller de capacitación en el Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nucleares de Seibersdorf (Austria) (izquierda), junto al mapa de “zonas calientes” de radiación obtenido (derecha). “CPS” significa cuentas por segundo. (Fuente: OIEA)

## Tendencias

145. Cada vez es más habitual el uso de matrices de puertas programables *in situ* (FPGA) como parte indisoluble de los sistemas de adquisición de datos de los detectores de radiación. La finalidad de dichas matrices es muy variada, y abarca desde la configuración de los parámetros de los sistemas de adquisición de datos y la transmisión o el enrutamiento de datos hasta la discriminación avanzada de señales o incluso la reconstrucción completa de sucesos. Los algoritmos de tratamiento de datos que se utilizan constituyen la base de funciones más complejas, ya sean convencionales o basadas en la IA. Un ejemplo de ello es la utilización de algoritmos de discriminación neutrón-gamma en aplicaciones de sistemas de FPGA integrados. Los campos de radiación mixtos son habituales en numerosas aplicaciones prácticas de la radiación ionizante, en las que es necesario usar detectores con capacidad de discriminación. Por ejemplo, en lugar de aplicar el enfoque tradicional que se basa en la discriminación por la forma del pulso en el dominio del tiempo, existe la posibilidad de utilizar algoritmos capaces de operar en el dominio de la frecuencia. Definiendo cuidadosamente una cifra de mérito adecuada, es posible acelerar el análisis necesario para la discriminación por la forma del pulso (y el campo de radiación) (véase la figura E.7). Esto ha llevado al desarrollo de aplicaciones en tiempo real de ese tipo de algoritmos, y su utilización ha sido la tendencia que han seguido en los últimos años los sistemas modernos de adquisición de datos, con un amplio abanico de aplicaciones que van desde las ciencias nucleares y la seguridad física nuclear hasta la protección radiológica y la física médica. Además, la difusión de la síntesis de alto nivel, es decir, la posibilidad de programar la placa FPGA en un lenguaje de alto nivel, ha facilitado el acceso de un mayor número de desarrolladores a las FPGA.

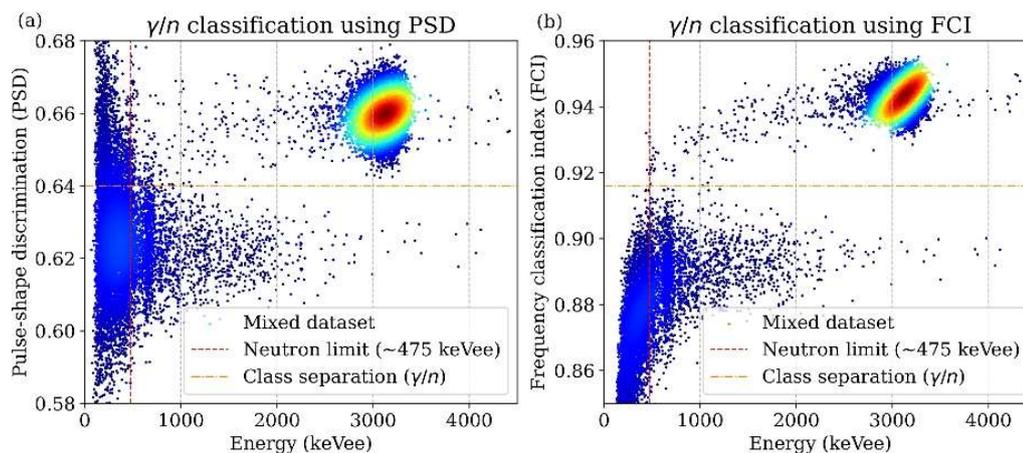


Fig. E.7. Comparación de la discriminación gamma-neutrón utilizando la discriminación tradicional por la forma del pulso (izquierda) y un índice de clasificación por frecuencias (derecha); el segundo método muestra resultados cualitativamente superiores en todo el rango de energía. Los datos experimentales se obtuvieron en la Instalación de Ciencia Neutrónica del Organismo, situada en Seibersdorf (Austria). (Fuente: Morales, I. R. et al., *Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications*)<sup>10</sup>

## F. Datos atómicos y nucleares

### Situación

146. El desarrollo del ITER impone una mayor dependencia de las bases de datos numéricos nucleares y atómicos, ya que los códigos de las simulaciones nucleares son cada vez más avanzados. En el ámbito de la neutrónica y la activación de materiales, esta dependencia implica el uso de la Biblioteca de Datos Nucleares Evaluados sobre Fusión, mientras que, en lo referente a las interacciones atómicas en el plasma de fusión, el ITER utiliza la base de datos CollisionDB.

### Tendencias

147. Varios Estados Miembros están invirtiendo más tiempo y recursos en el ITER a fin de obtener datos de alta calidad relativos a las interacciones gamma. Las principales aplicaciones de esos datos son la exploración neutrónica activa, estimaciones más precisas del calentamiento por rayos gamma en el blindaje de los reactores de fisión y dispositivos de fusión e innovaciones en aplicaciones espaciales. Para conseguir datos de alta calidad sobre las interacciones gamma, es necesario actualizar con información experimental y teórica más reciente las bases de datos nucleares antiguas que contienen datos de reacciones gamma. Para ello, se están llevando a cabo nuevas iniciativas de evaluación de datos nucleares.

148. El rápido crecimiento de la demanda mundial de radioisótopos de uso médico, para fines tanto diagnósticos como terapéuticos, también está afectando considerablemente a los datos nucleares. Se necesitan secciones eficaces de producción que tengan una exactitud mucho mayor, en particular en lo que respecta a las vías optimizadas de producción de isótopos con un nivel mínimo de impurezas. La necesidad de secciones eficaces de producción más exactas exige mayores esfuerzos por parte de los físicos nucleares experimentales y de quienes elaboran modelos teóricos de reacciones nucleares.

<sup>10</sup> Morales, I. R. et al. Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications. *Nuclear Engineering and Technology* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.013>

## **G. Aplicación de la inteligencia artificial en la energía nucleoelectrica y en el ciclo del combustible nuclear**

### **Situación**

149. “Inteligencia artificial” (IA) es un término amplio, que abarca diversas tecnologías desarrolladas durante décadas. La IA tiene un potencial prometedor para avanzar en la producción de energía nuclear. Hay sistemas de IA sofisticados que imitan la lógica humana en la resolución de problemas y la toma de decisiones. Con su capacidad para mejorar la eficiencia, la automatización, la seguridad y el mantenimiento predictivo, así como para optimizar procesos, la IA ya está logrando grandes avances en algunas esferas del ámbito nuclear.

150. Se están utilizando aplicaciones de la IA en centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible que están en funcionamiento. Actualmente, estas aplicaciones son independientes de los sistemas, procesos o funciones relacionados con la seguridad. En el caso de las aplicaciones de examen no destructivo, por ejemplo, esto garantiza que se incrementen la velocidad y la exactitud de las inspecciones, que los responsables de tomar decisiones relativas a los diseños óptimos de carga del núcleo reciban la información necesaria y que se racionalicen los programas complejos de paradas de mantenimiento. Otras aplicaciones de la IA son la mejora de la evaluación y la optimización de diseños nucleares avanzados mediante códigos y modelos matemáticos basados en la IA.

151. La labor actual en materia de seguridad tecnológica, seguridad física y fiabilidad en relación con la IA se centra en la determinación de los riesgos y de las consecuencias de los fallos, la explicabilidad, la confianza y las consideraciones éticas asociadas al despliegue constante de la IA. Los escenarios futuros de despliegue de IA que impliquen procesos o sistemas digitales de instalaciones pueden afectar a la seguridad nuclear tecnológica y física de una central nuclear. Además, tal y como es habitual en lo que respecta a cualquier sistema digital, en paralelo a los distintos escenarios de aplicación se están elaborando medidas adecuadas que garanticen la validación y la ciberseguridad. Las organizaciones interesadas están desarrollando activamente enfoques para la gestión de la tecnología de IA en las instalaciones nucleares y de radiación.

### **Tendencias**

152. La IA se está aplicando cada vez más a la energía nucleoelectrica comercial y al diseño y la explotación de instalaciones del ciclo del combustible nuclear. Puede mejorar la seguridad, la eficiencia operacional y la relación costo-eficacia, al tiempo que facilita el desarrollo de tecnologías nucleares avanzadas. Los sistemas basados en la IA contribuyen al análisis de macrodatos recopilados durante la explotación para aumentar la fiabilidad operacional y evitar accidentes que involucren al personal. Estos avances contribuyen a la sostenibilidad y la competitividad de la energía nuclear en el panorama energético moderno.

153. La IA se utiliza de diversas maneras para mejorar la seguridad, la eficiencia y la relación costo-eficacia en la industria nuclear. En lo que respecta a la seguridad y el mantenimiento, se emplea para predecir fallos de los equipos, analizar datos de los sensores y optimizar los programas de mantenimiento con miras a reducir el tiempo de inactividad y mejorar la seguridad. Por ejemplo, actualmente ciertos algoritmos de aprendizaje automático pueden ayudar a detectar anomalías y a mejorar los sistemas de alerta temprana. Asimismo, la IA se usa cada vez más para determinar eficazmente correlaciones de sucesos de bajo nivel (incluidos los repetitivos) en documentos y fuentes de datos históricos no estructurados. Este mecanismo hace posible detectar sistemáticamente sucesos recurrentes para los que no se han adoptado medidas correctoras, así como reducir el tiempo de búsqueda de sucesos importantes por orden de magnitud (investigación de infracciones, desviaciones, defectos importantes, etc.).

154. La I+D en materia de aplicación de la IA ha demostrado su potencial para optimizar de manera eficiente el diseño del núcleo en aplicaciones de reactores nucleares de potencia y avanzados. Las soluciones basadas en la IA pueden optimizar los esquemas de carga del combustible y amplían la duración de la carga de combustible. De este modo, se podría aumentar la potencia de salida, minimizar la producción de desechos y reducir los costos de explotación. Además, la IA tiene el potencial de contribuir al diseño de reactores nucleares avanzados e instalaciones del ciclo del combustible mediante la simulación de procesos físicos complejos, lo que podría resultar en mejores diseños y un menor tiempo de desarrollo. Se espera que el desarrollo y el despliegue de soluciones de IA en la industria de la energía nucleoelectrónica comercial y las instalaciones del ciclo del combustible se aceleren a medida que se acumule experiencia y se resuelvan las incertidumbres.

155. La IA se usa cada vez más en el análisis de datos de video para ayudar al personal de operación a garantizar la seguridad en las instalaciones de producción y operacionales. Esto se aplica tanto a los mecanismos de control del equipo de protección individual como a la seguridad del personal en el emplazamiento.

## H. Salud humana

### H.1. Evaluación no invasiva de la función digestiva del intestino: una prueba del aliento optimizada con sacarosa marcada con carbono 13

#### Situación

156. Una de las cuestiones más acuciantes de salud pública en materia de nutrición es por qué los niños de los países de ingreso mediano y bajo sufren de retraso del crecimiento (baja estatura para su edad) a pesar de las múltiples intervenciones de salud pública, como los complementos alimenticios y la mejora de la higiene del agua. El último informe conjunto de los organismos de las Naciones Unidas sobre seguridad alimentaria y nutrición indica que alrededor de 150 millones de niños menores de cinco años sufren de retraso del crecimiento, lo que acarrea funestas consecuencias para su desarrollo psicomotor y el riesgo de sufrir enfermedades crónicas en etapas posteriores de la vida<sup>11</sup>. Si bien los factores asociados al retraso del crecimiento son complejos y no se comprenden plenamente, la enteropatía ambiental, que se caracteriza por la alteración sistémica y crónica de la integridad estructural y el funcionamiento de los intestinos, está cada vez más implicada en el retraso del crecimiento en niños que viven en condiciones insalubres en países de ingreso mediano y bajo<sup>12</sup>. Es posible que la enteropatía ambiental contribuya al retraso del crecimiento de distintas formas, entre las que se encuentran una mayor permeabilidad del intestino, la inflamación y una menor absorción de nutrientes<sup>2</sup>. Los criterios para el diagnóstico de la enteropatía ambiental están poco desarrollados, y el enfoque más sólido se basa en la biopsia invasiva para diagnosticar daños en el intestino. En la mayoría de los países de ingreso mediano y bajo donde es común la enteropatía ambiental, ese enfoque no es viable ni se puede justificar desde un punto de vista ético.

---

<sup>11</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, Programa Mundial de Alimentos y Organización Mundial de la Salud. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano*, FAO, Roma (2023).

<sup>12</sup> Owino, V., et al., Environmental Enteric Dysfunction and Growth Failure/Stunting in Global Child Health, *Pediatrics*. 138 6 (2016).

157. La prueba del aliento, que se ha empleado en aplicaciones de salud humana como la gastroenterología, no es invasiva y se puede utilizar en todos los grupos de edad, incluidos los niños<sup>13</sup>. Entre las pruebas del aliento habituales se encuentran las que utilizan hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono marcado con carbono 13 (<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>). Las pruebas del aliento con H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se realizan principalmente para evaluar la malabsorción general de los carbohidratos<sup>3,14</sup>. Por su parte, las pruebas del aliento con carbono 13 (<sup>13</sup>C) se utilizan en gastroenterología para evaluar una gran variedad de síntomas, porque en ellas se emplean determinadas moléculas marcadas con <sup>13</sup>C para centrarse en funciones concretas y medir el contenido de <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> en el aliento como producto final del metabolismo. Una aplicación clínica establecida es la prueba del aliento con <sup>13</sup>C, que utiliza urea marcada con <sup>13</sup>C para diagnosticar la presencia de *Helicobacter pylori*<sup>15</sup>. No obstante, las aplicaciones de las pruebas del aliento se han circunscrito en gran medida a contextos clínicos, y han tenido un uso limitado en el ámbito de la nutrición en la salud pública.

158. La prueba del aliento con sacarosa <sup>13</sup>C (<sup>13</sup>C-SBT) se ha utilizado previamente para estudiar la digestión de la sacarosa en el contexto de la deficiencia congénita de sacarasa-isomaltasa<sup>16</sup>. El enriquecimiento del aliento con <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> tras la ingestión de sacarosa <sup>13</sup>C es indicativo de alteraciones en la capacidad del intestino para digerir la sacarosa, y refleja una actividad reducida de la sacarasa-isomaltasa duodenal (la enzima del intestino que debe descomponer la sacarosa en glucosa y fructosa para que puedan ser absorbidas y metabolizadas) (figuras H.1 y H.2). La <sup>13</sup>C-SBT también se ha utilizado como marcador de la ingesta de azúcares añadidos en ratas<sup>17</sup>. Ritchie y sus colaboradores fueron los primeros en utilizar la <sup>13</sup>C-SBT para evaluar la enteropatía ambiental, en un estudio sobre niños australianos con diarrea<sup>18</sup>. En ese estudio, se administró una dosis oral de sacarosa naturalmente enriquecida (procedente del maíz, que está ligeramente enriquecido en <sup>13</sup>C frente al azúcar de remolacha) a niños aborígenes con y sin diarrea aguda y a un grupo de control formado por niños no aborígenes sanos. La recuperación de <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> tras 90 minutos fue menor en los niños aborígenes que sufrían diarrea que en los que no la sufrían; los niños no aborígenes sanos presentaron una mayor recuperación de <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>. No obstante, esta prueba es insensible, principalmente porque la señal de <sup>13</sup>C procedente de la sacarosa del maíz no destaca lo suficiente sobre el fondo natural y variable de abundancia de <sup>13</sup>C (alrededor del 1,1 %), ni siquiera con dosis muy grandes de sacarosa<sup>19,20</sup>.

---

<sup>13</sup> Broekaert, I.J., et al., An ESPGHAN Position Paper on the Use of Breath Testing in Paediatric Gastroenterology, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 74 1 (2022) 123–37.

<sup>14</sup> Hammer, H.F., et al., European guideline on indications, performance, and clinical impact of hydrogen and methane breath tests in adult and pediatric patients: European Association for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Neurogastroenterology and Motility, and European Society for Paediatric Gastroenterology Hepatology and Nutrition consensus, *United European Gastroenterology Journal*. 10 1 (2022) 15–40.

<sup>15</sup> Keller, J., et al., European guideline on indications, performance and clinical impact of <sup>13</sup>C-breath tests in adult and pediatric patients: An EAGEN, ESNM, and ESPGHAN consensus, supported by EPC, *United European Gastroenterology Journal*. 9 5 (2021) 598–625.

<sup>16</sup> Robayo-Torres, C.C., et al., <sup>13</sup>C-breath tests for sucrose digestion in congenital sucrase isomaltase-deficient and sacrosidase-supplemented patients, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 48 4 (2009) 412–8.

<sup>17</sup> Yazbeck, R., et al., Breath <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>-evidence for a noninvasive biomarker to measure added refined sugar uptake, *Journal of Applied Physiology*. 130 4 (2021) 1025–32.

<sup>18</sup> Ritchie, B.K., et al., <sup>13</sup>C-Sucrose Breath Test: Novel Use of a Noninvasive Biomarker of Environmental Gut Health, *Pediatrics*. 124 2 (2009) 620–6.

<sup>19</sup> International Atomic Energy Agency, New approaches for stable isotope ratio measurements, *Proceedings of an Advisory Group meeting held in Vienna, 20–23 September 1999, IAEA-TECDOC-1247, IAEA, Vienna (2001)*.

<sup>20</sup> Butler, R.N., et al., Stable Isotope Techniques for the Assessment of Host and Microbiota Response During Gastrointestinal Dysfunction, *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 64 1 (2017) 8–14.

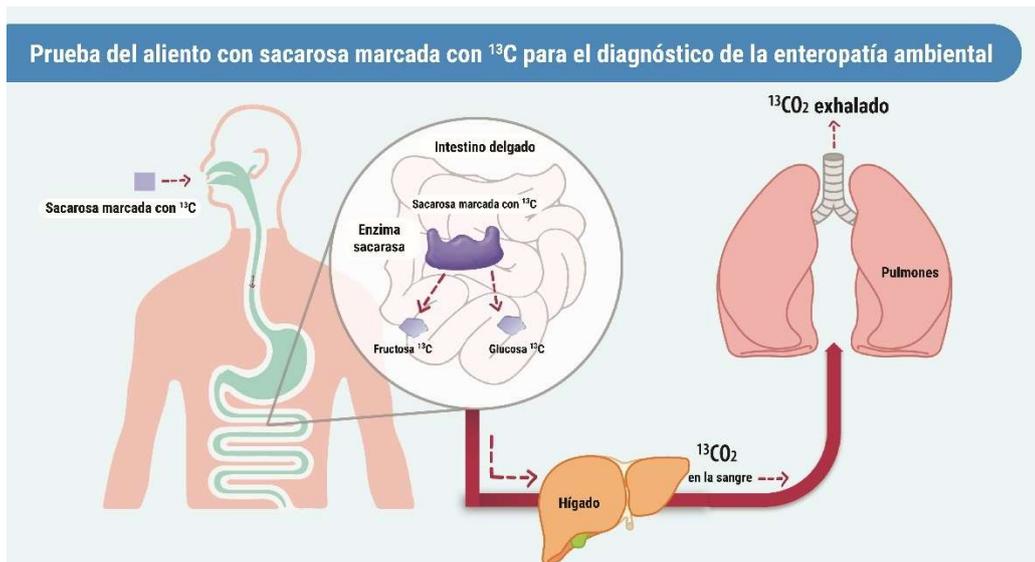


Fig. H.1. Una persona ingiere una dosis de sacarosa marcada con  $^{13}\text{C}$ , pesada con exactitud y disuelta en una pequeña cantidad de agua. La sacarosa  $^{13}\text{C}$  se transporta a través del epitelio intestinal hasta el borde en cepillo, donde la enzima sacarasa-isomaltasa la hidroliza en fructosa  $^{13}\text{C}$  y glucosa  $^{13}\text{C}$ , las cuales pasan al torrente sanguíneo y se transportan hasta el hígado, donde se descomponen a diferentes velocidades para producir energía, proceso que va acompañado de la producción de  $^{13}\text{CO}_2$ , que se exhala en el aliento. El porcentaje de recuperación de  $^{13}\text{C}$  en el  $^{13}\text{CO}_2$  frente al  $^{13}\text{C}$  presente originalmente en la sacarosa marcada es un indicador de la capacidad de absorción del intestino y se correlaciona con la actividad de la sacarasa-isomaltasa. (Gráfico: OIEA)



Fig. H.2. En el caso de los niños mayores y los adultos, el aliento se recoge mediante la espiración en una bolsa de toma de muestras de aliento como la que se muestra en la imagen. En el caso de los lactantes y los niños pequeños, se coloca una mascarilla en la bolsa. (Gráfico: OIEA)

159. Se puede utilizar sacarosa muy enriquecida (99 %) para mejorar la sensibilidad de la  $^{13}\text{C}$ -SBT<sup>21</sup>. Un proyecto coordinado de investigación (PCI) del Organismo, titulado “Aplicación de técnicas de isótopos estables en la evaluación de la enteropatía ambiental y comprensión de sus repercusiones en el crecimiento infantil”, ayudó a nueve países a optimizar y aplicar la  $^{13}\text{C}$ -SBT para evaluar la enteropatía ambiental y a comprender cómo repercute esta en el crecimiento infantil. En la primera fase del proyecto<sup>22</sup>, se optimizó y validó la prueba comparando los resultados obtenidos con trazadores de sacarosa muy enriquecida y los obtenidos con sacarosa naturalmente enriquecida en el Reino Unido. La prueba optimizada se aplicó a niños con celiaquía en Australia y se comparó con resultados de biopsias realizadas a adultos de Zambia y con pruebas de permeabilidad intestinal efectuadas en niños del Perú. En la segunda fase del proyecto, la prueba se utilizó en estudios transversales en Bangladesh, la India, Jamaica, Kenya, el Perú y Zambia para evaluar la enteropatía ambiental en niños de entre 12 y 15 meses.

## Tendencias

160. La  $^{13}\text{C}$ -SBT es una prueba del aliento no invasiva destinada a medir pequeños daños intestinales asociados a la enteropatía ambiental, por medio de una dosis oral de sacarosa marcada con  $^{13}\text{C}$ . Los estudios de validación llevados a cabo en el Reino Unido y Zambia demostraron que se podía utilizar una dosis pequeña de sacarosa marcada con  $^{13}\text{C}$  muy enriquecida para evaluar con exactitud la actividad enzimática en el borde en cepillo, concretamente la actividad de la sacarasa-isomaltasa presente en el intestino<sup>11</sup>. No obstante, esta prueba tiene como limitación que los resultados no estaban vinculados directamente a los procesos biológicos subyacentes del intestino. Por ese motivo, los investigadores han trabajado en el desarrollo de nuevos modelos mecánicos que permitan comprender mejor la dinámica metabólica que tiene lugar en el intestino<sup>23</sup>. Esos modelos han puesto de relieve la importancia de distinguir entre el metabolismo de la fructosa y la glucosa presentes en la sacarosa marcada con  $^{13}\text{C}$ . Para lograr una mejor correspondencia con los mecanismos biológicos que intervienen en la  $^{13}\text{C}$ -SBT, se recomienda utilizar sacarosa marcada con glucosa  $^{13}\text{C}$ . Si se desean obtener resultados más globales, la  $^{13}\text{C}$ -SBT se puede utilizar junto con otras pruebas para abarcar aspectos adicionales de la enteropatía ambiental más allá de la digestión de la sacarosa.

## H.2. Garantizar la calidad: novedades en el ámbito de la braquiterapia

### Situación

161. El cáncer cervicouterino continúa planteando un importante desafío, ya que es el cuarto tipo de cáncer más frecuente en las mujeres a escala mundial. En 2020, alrededor del 90 % de los nuevos casos y las muertes se registraron en países de ingreso mediano y bajo<sup>24</sup>. La iniciativa Rayos de Esperanza del OIEA pretende aumentar el acceso al tratamiento oncológico, haciendo especial hincapié en África, donde el 70 % de la población carece de acceso a la radioterapia. En su primera oleada, Rayos de Esperanza se centra en siete países (Benin, Chad, Kenya, Malawi, Níger, República Democrática del Congo y Senegal) en los que el cáncer cervicouterino es el primer o el segundo tipo de cáncer más prevalente en las mujeres.

---

<sup>21</sup> Schillinger, R.J., et al.,  $^{13}\text{C}$ -sucrose breath test for the non-invasive assessment of environmental enteropathy in Zambian adults, *Frontiers in Medicine*. 9 (2022).

<sup>22</sup> Lee, G.O., et al., Optimisation, validation and field applicability of a  $^{13}\text{C}$ -sucrose breath test to assess intestinal function in environmental enteropathy among children in resource poor settings: study protocol for a prospective study in Bangladesh, India, Kenya, Jamaica, Peru and Zambia, *BMJ Open*. 10 11 (2020).

<sup>23</sup> Brouwer, A.F., et al., Mechanistic inference of the metabolic rates underlying  $^{13}\text{C}$  breath test curves, *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*. 50 3 (2023) 203–14.

<sup>24</sup> Sung, H., et al., Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, *CA Cancer Journal for Clinicians*. 71 (2021) 209–49.

Rayos de Esperanza hará frente a los retos asociados al cáncer cervicouterino mediante actividades de concienciación, capacitación y creación de capacidad y el aumento del acceso al tratamiento y la atención.



*Fig. H.3. En un acto paralelo sobre la iniciativa Rayos de Esperanza del OIEA celebrado durante la sexagésima séptima reunión de la Conferencia General del OIEA se crearon oficialmente cinco Centros de Referencia inaugurales. (Fotografía: OIEA)*

162. El tratamiento del cáncer cervicouterino requiere una combinación de cirugía, quimioterapia y radioterapia. La braquiterapia, componente esencial de la radioterapia, desempeña un papel crucial en el tratamiento de esta enfermedad; además, la braquiterapia moderna está respaldada por pruebas sólidas acerca de la relación entre la dosis administrada y su efecto clínico. Sin embargo, dado que con la braquiterapia se administran dosis considerablemente mayores que con la radioterapia externa, el tratamiento con braquiterapia plantea un desafío único: se debe optimizar de manera meticulosa a fin de evitar efectos clínicos adversos derivados de una dosis insuficiente o excesiva.

163. La calidad y la seguridad de esta opción terapéutica dependen esencialmente de que se garantice una administración homogénea de las dosis. Esto, además, puede fomentar la confianza del público en la braquiterapia, la cual se ha visto socavada por incidentes que se notificaron en el pasado, incluido un fallecimiento, y que se atribuyeron al error humano. La verificación dosimétrica puede prevenir incidentes catastróficos y minimizar la variación sistemática de las dosis.

164. Desde su creación, en 1969, el programa postal de verificación dosimétrica del Organismo presta servicios de verificación en relación con diversas tecnologías de radioterapia a través del Laboratorio de Dosimetría del Organismo a Estados Miembros que carecen de capacidad de efectuar dicha verificación a nivel nacional. Este fundamental servicio ha contribuido de manera notable a la seguridad de las prácticas de radioterapia en todo el mundo y ha beneficiado a millones de pacientes con cáncer.

165. En el caso de la braquiterapia, existe además un déficit cada vez mayor en el ámbito de la enseñanza y capacitación, agravado por la creciente complejidad de la tecnología y la falta de equipos de capacitación. Los países de ingreso mediano y bajo cuentan con pocas posibilidades, o ninguna, para desarrollar los recursos humanos que se necesitan para utilizar esta técnica de manera segura y eficaz.

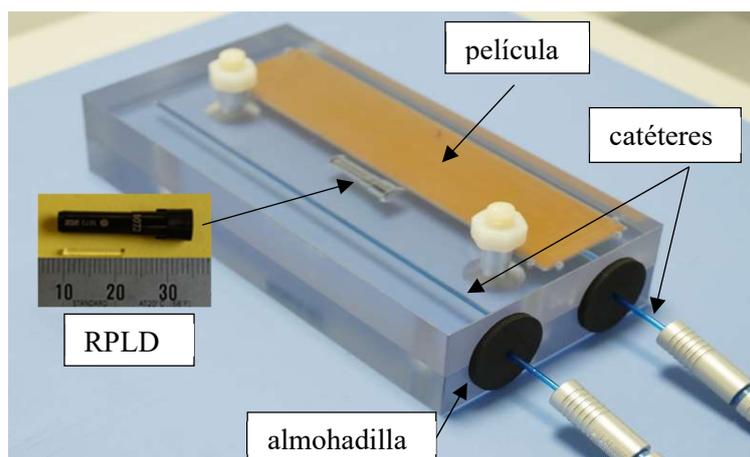
166. El Organismo está utilizando la realidad virtual a modo de herramienta innovadora para eliminar ese déficit de competencias de forma eficaz en función del costo. Ha elaborado material de aprendizaje electrónico sobre procedimientos de braquiterapia ginecológica, que se ofrece en un entorno de aprendizaje tridimensional basado en la realidad virtual (figura H.4). Esta tecnología, como alternativa a los pacientes reales, permite a los alumnos practicar la braquiterapia, lo que ayuda a mejorar el tratamiento y la atención del cáncer cervicouterino, especialmente en contextos en que hay escasez de recursos.



*Fig. H.4. El nuevo módulo de aprendizaje electrónico del Organismo sobre procedimientos de braquiterapia ginecológica, que se utiliza con un casco de realidad virtual. (Fotografía: OIEA)*

## **Tendencias**

167. En 2021 el Organismo puso en marcha un PCI titulado “Elaboración de una metodología para la verificación dosimétrica en braquiterapia”, cuya finalidad es elaborar una metodología de verificación dosimétrica que contemplará tres niveles de complejidad para verificar la práctica clínica. Esta metodología beneficiará a los países al garantizar el tratamiento seguro y eficaz de los cánceres ginecológicos. Hasta la fecha, se ha desarrollado un nivel de verificación básico que evalúa la exactitud de un parámetro dosimétrico esencial: la tasa de referencia de kerma en aire. También se ha creado un maniquí sencillo, ligero y económico, adecuado para el servicio postal de verificación dosimétrica a distancia (figura H.5).



*Fig. H.5. Maniquí sencillo, ligero y económico creado en el Laboratorio de Dosimetría del Organismo y utilizado para la verificación en braquiterapia (dosímetro radiofotoluminiscente (RPLD)). (Fotografía: OIEA)*

168. La metodología se ha probado en diez países participantes (Brasil, China, Croacia, Federación de Rusia, Grecia, India, República Islámica del Irán, México, Reino Unido y Sudáfrica) que representan distintos contextos clínicos, lo que garantiza su solidez. Puesto que los resultados experimentales son tan prometedores, pronto se dispondrá de un servicio de verificación para braquiterapia como parte del programa postal de verificación dosimétrica del Organismo.

169. Asimismo, la investigación en curso en el marco del PCI tiene el objetivo de elaborar una metodología para llevar a cabo una verificación más compleja. Una verificación integral permitirá a los hospitales utilizar sus propios aplicadores para completar todo el flujo de trabajo relativo al tratamiento de los pacientes. Este avance, a su vez, aumentará la confianza en la práctica clínica de la braquiterapia y garantizará la seguridad de los pacientes y la calidad del tratamiento.

170. Los beneficios de la nueva herramienta de realidad virtual del Organismo para la enseñanza y la capacitación sobre braquiterapia se demostraron en un taller que celebró el Organismo en Mozambique en julio de 2023. Profesionales del país pudieron practicar diversos procesos relacionados con la braquiterapia ginecológica antes de aplicar la técnica en el entorno clínico (figura H.6) Más de 150 radioncólogos, físicos médicos, dosimetristas y radioterapeutas de toda África también pudieron hacer prácticas con esta herramienta en el taller sobre delimitación por medios electrónicos impartido por el Organismo en la 14ª Conferencia Internacional sobre el Cáncer en África, celebrada por la Organización Africana de Formación e Investigación en Oncología en el Senegal en noviembre de 2023.



*Fig. H.6. Profesionales sanitarios (una física médica y un radioncólogo) en Mozambique reciben formación sobre braquiterapia con la nueva herramienta de realidad virtual del Organismo.  
(Fotografías: OIEA)*

171. La herramienta de realidad virtual del Organismo es una tecnología de enorme valor para mejorar el acceso de los profesionales sanitarios a la capacitación de alta calidad y a la adquisición interactiva de competencias. Puede ayudar a salvar las limitaciones físicas, geográficas y logísticas y catalizar el desarrollo de una fuerza de trabajo muy capacitada y profesional de atención oncológica, contribuyendo así en última instancia a la salud y el bienestar a escala mundial.

### **H.3. Ver el corazón por dentro: el papel crucial de la imagenología nuclear en el diagnóstico de la amiloidosis cardíaca**

#### **Situación**

172. La insuficiencia cardíaca se produce cuando al corazón le cuesta bombear sangre de manera eficaz, lo que produce un déficit de oxígeno y nutrientes en los tejidos y órganos del cuerpo. Entre sus posibles síntomas se encuentran la fatiga, la dificultad respiratoria y la retención de líquidos. En casos graves, la insuficiencia cardíaca puede dar lugar a complicaciones potencialmente mortales. La detección precoz y el tratamiento adecuado son fundamentales para mejorar los resultados y mitigar el riesgo de que surjan complicaciones.

173. Por lo general, la insuficiencia cardíaca se clasifica en dos tipos principales en función de la fracción de eyección, que indica el porcentaje de sangre que expulsa el corazón con cada latido. Por ejemplo, una fracción de eyección del 60 % significa que, con cada contracción, el corazón bombea el 60 % de la sangre que contiene. Aunque los valores normales de la fracción de eyección se suelen situar entre el 50 % y el 70 %, estos límites pueden variar ligeramente en función de las orientaciones médicas y de la técnica de imagenología que se emplee para la medición. Una fracción de eyección por debajo del rango normal indica una reducción de la capacidad del corazón para bombear sangre con eficacia, lo cual es un síntoma habitual de la insuficiencia cardíaca.

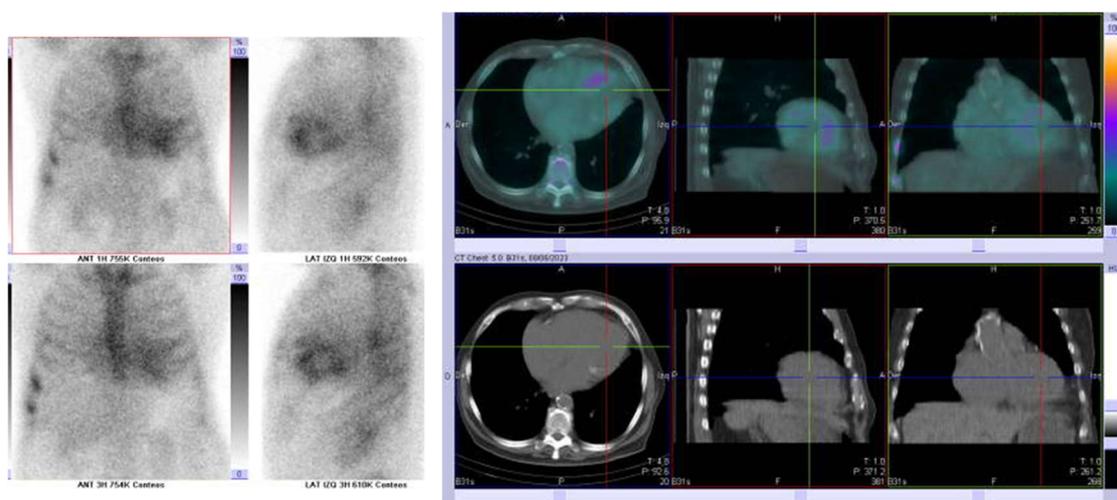
174. En el caso de la insuficiencia cardíaca con fracción de eyección reducida, el miocardio está debilitado y el corazón es menos eficiente bombeando sangre. Las personas que presentan esta afección suelen tener una fracción de eyección inferior al 40 %. En el caso de la insuficiencia cardíaca con fracción de eyección conservada, el corazón bombea con normalidad, pero el músculo está rígido y no se relaja como debería entre latidos. La fracción de eyección es normal o casi normal, generalmente superior o igual al 50 %. Puesto que las causas de la insuficiencia cardíaca y las estrategias de tratamiento son diversas, estas clasificaciones ayudan a orientar los enfoques terapéuticos. Cabe señalar que la insuficiencia cardíaca es una afección compleja, y cada caso podría tener causas subyacentes o factores coadyuvantes distintos.

175. A menudo, la insuficiencia cardíaca con fracción de eyección conservada se debe a una combinación de factores. Entre los factores coadyuvantes habituales se encuentran la hipertensión, que puede causar el engrosamiento y la rigidización del miocardio; el envejecimiento, que puede afectar a la estructura y el funcionamiento del corazón; la diabetes, que puede contribuir a la rigidez del miocardio; la obesidad, en especial el exceso de peso corporal alrededor del abdomen; y la arteriopatía coronaria, que reduce el flujo de sangre al miocardio como consecuencia del estrechamiento o la obstrucción de las arterias coronarias. Un factor coadyuvante importante al que se ha prestado cada vez más atención en los últimos cinco años es la amiloidosis cardíaca por transtiretina, un trastorno que se caracteriza por depósitos de proteínas anormales (amiloides) en el tejido cardíaco. Se estima que afecta a entre el 13 % y el 18 % de los adultos mayores de 65 años que padecen insuficiencia cardíaca, y lleva aparejada una supervivencia mediana de entre 25 y 41 meses.

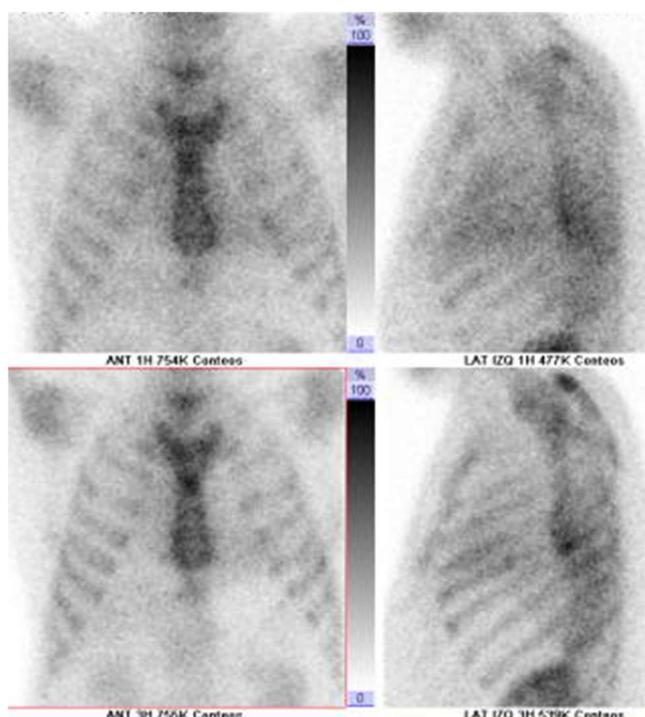
176. Los avances recientes en investigación médica y estrategias terapéuticas han supuesto el inicio de una nueva era de esperanza para los pacientes con amiloidosis cardíaca. Los medicamentos innovadores que actúan sobre los mecanismos subyacentes de los depósitos de amiloides disponibles desde principios de 2019, junto con las herramientas mejoradas de diagnóstico por la imagen, como las de cardiología nuclear, han permitido a los proveedores de atención médica intervenir antes y con más eficacia. Este cambio de paradigma, impulsado por la evolución del conocimiento de la amiloidosis cardíaca y por la disponibilidad de tratamientos, representa un enorme avance, ya que ofrece a los pacientes un futuro más esperanzador. A pesar de estos progresos, el infradiagnóstico de la amiloidosis cardíaca por transtiretina dificulta que se aprovechen plenamente los adelantos en el tratamiento.

## **Tendencias**

177. La cardiología nuclear desempeña un papel crucial en la evaluación de la amiloidosis cardíaca. Mediante el uso de técnicas de imagenología avanzadas, como la exploración con pirofosfato de tecnecio 99m, permite detectar con precisión la amiloidosis cardíaca y diferenciarla de otras cardiopatías. Estas técnicas de imagenología proporcionan información valiosa sobre la afectación miocárdica y contribuyen al diagnóstico precoz y a la estratificación del riesgo (figuras H.7 y H.8). La cardiología nuclear permite evaluar el alcance y la gravedad de los depósitos de amiloides, con lo que ayuda a los profesionales sanitarios a adaptar las intervenciones terapéuticas adecuadas y a vigilar la evolución de la enfermedad. Además, la naturaleza no invasiva de estas técnicas las hace especialmente valiosas para la evaluación exhaustiva de la amiloidosis cardíaca, lo que contribuye a su vez a un tratamiento más oportuno y preciso de la enfermedad.



*Fig. H.7. Imágenes estáticas anterior y lateral (izquierda) e imágenes obtenidas por tomografía computarizada por emisión de fotón único combinada con tomografía computarizada (SPECT-CT) (derecha) de un paciente con una captación focal intensa anormal de pirofosfato de tecnecio 99m en el miocardio, compatible con la amiloidosis cardíaca por transtiretina.  
(Fotografías: A. Jiménez-Hefferman/Hospital Juan Ramón Jiménez)*



*Fig. H.8. Imágenes estáticas anteriores y laterales de un paciente sin captación anormal de pirofosfato de tecnecio 99m en el miocardio, lo que permite descartar la amiloidosis cardíaca por transtiretina como causa de la insuficiencia cardíaca del paciente.  
(Fotografías: A. Jiménez-Hefferman/Hospital Juan Ramón Jiménez)*

178. A pesar de que se dispone de la tecnología y los conocimientos especializados que requiere la SPECT con pirofosfato de tecnecio 99m, su aplicación en el diagnóstico de la amiloidosis cardíaca por transtiretina es limitada en muchos países. Dado que los criterios de diagnóstico actuales de la

enfermedad fueron elaborados por especialistas de los Estados Unidos de América y Europa, se desconoce si son válidos para la población étnica y socioeconómicamente diversa del resto del mundo.

179. El Organismo está llevando a cabo un PCI titulado “Estudio del OIEA sobre la amiloidosis cardíaca por transtiretina: el estudio I-TAC” que pretende crear competencias sostenibles a escala mundial para aplicar de forma precisa la imagenología con pirofosfato a fin de diagnosticar con eficacia la amiloidosis cardíaca por transtiretina. Eso contribuirá a mejorar en todo el mundo la detección y el tratamiento de la insuficiencia cardíaca con fracción de eyección conservada. En los esfuerzos en pro de la detección precoz y la búsqueda de tratamientos que salven vidas, la cardiología nuclear se perfila como un referente mundial que señala un camino de esperanza para las personas que padecen amiloidosis cardíaca.

## **I. Alimentación y agricultura**

### **I.1. Tecnologías de irradiación para el desarrollo de vacunas: aplicaciones de las tecnologías nucleares para prevenir enfermedades infecciosas en el ganado**

#### **Situación**

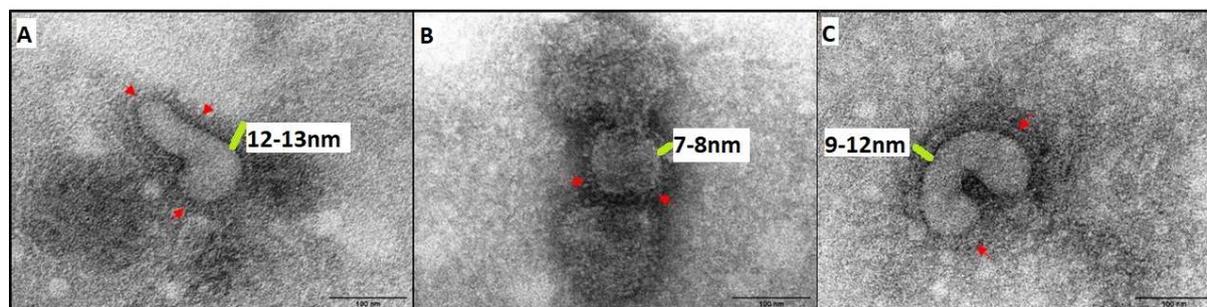
180. Las enfermedades infecciosas en el sector de la ganadería pueden causar enormes pérdidas económicas a escala mundial. Por ejemplo, a lo largo de los siglos, las epidemias de peste bovina han ocasionado la muerte de una gran cantidad de cabezas de ganado en todo el mundo, y han dado lugar a períodos continuos de escasez de alimentos y hambrunas generalizadas en regiones rurales, especialmente de África y Asia. En 2011, gracias al desarrollo de una vacuna eficaz y a la aplicación de programas de vacunación generalizados, esta devastadora enfermedad se declaró erradicada a nivel mundial.

181. Las vacunas suelen ser la estrategia más eficaz en función del costo para prevenir enfermedades. Es muy necesario acelerar el diseño y la producción de vacunas contra patógenos emergentes y reemergentes, que son difíciles de controlar y pueden causar epidemias devastadoras. Esta demanda creciente de vacunas seguras para controlar enfermedades prioritarias pone de relieve la importancia de evaluar nuevas plataformas de producción de vacunas que requieran infraestructura de bajo costo pero eficiente. El enfoque aplicado tradicionalmente para la fabricación de vacunas, que consiste en la inactivación de los patógenos, sigue siendo una manera eficiente y rápida de desarrollar nuevas vacunas.

182. Actualmente, la inactivación química es la técnica más utilizada en la producción de vacunas. No obstante, en comparación con la inactivación química, la inactivación por irradiación ofrece multitud de ventajas que podrían ser interesantes. Las sustancias químicas utilizadas para la inactivación pueden modificar proteínas esenciales de los patógenos que son las que desencadenan la respuesta inmunitaria. En cambio, la inactivación por irradiación preserva esas proteínas, así como la integridad estructural de los patógenos, lo que contribuye a inducir una respuesta inmunitaria en la persona vacunada al exponerse al patógeno. Sin embargo, la inactivación por irradiación sí daña el material genético del patógeno, de forma que le impide reproducirse y causar una infección. Aunque la tecnología se lleva utilizando más de 50 años, el interés por el uso de la irradiación para la producción de vacunas no ha resurgido hasta hace poco, debido a la aparición de nuevos irradiadores que pueden administrar dosis de radiación precisas en períodos más cortos, y a un mejor conocimiento del sistema inmunitario, que permite evaluar con mayor eficacia las repuestas a la vacunación.

183. En el último decenio, el Organismo, a través del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, ha logrado importantes avances en este ámbito, mediante

actividades de investigación y desarrollo sobre el uso de la inactivación por irradiación para producir vacunas contra más de 20 agentes patógenos animales y zoonóticos. Esa labor de investigación incluye determinar la dosis adecuada de radiación para destruir los agentes patógenos, establecer parámetros para las vacunas y estudiar los efectos de la vacunación<sup>25</sup>. Por ejemplo, un prototipo de vacuna irradiada contra la gripe en pollos arrojó resultados prometedores durante las pruebas<sup>26</sup>.



*Fig. I.1. Características de las vacunas irradiadas frente a las vacunas tradicionales inactivadas químicamente: A: virus de la gripe vivo; B: virus de la gripe inactivado químicamente y con daños estructurales; y C: virus de la gripe inactivado por irradiación cuya estructura guarda semejanza con la del virus vivo, de forma que, con la vacunación, se crea un recuerdo perfecto del agente patógeno en la persona vacunada, quien podrá combatirlo cuando se vea expuesta a él. Las flechas rojas muestran las moléculas responsables de inducir la inmunidad en el candidato vacunado y las líneas verdes muestran la longitud de esas moléculas. (Fuente: F. Bonfante/IZSve (Italia) y *Frontiers in Veterinary Science*, 11 de julio de 2022)*

## Tendencias

184. Además de su aplicación en la producción de vacunas inactivadas, la irradiación puede emplearse para producir organismos metabólicamente activos pero que no se replican, que podrían utilizarse como vacunas, especialmente contra enfermedades bacterianas y parasitarias. La dosis de radiación se puede ajustar hasta un nivel que impida reproducirse a los microbios expuestos a ella (es decir, que les impida causar una infección), pero les permita conservar su función metabólica. La ventaja de este método es que se crea inmunidad no solo contra la estructura, sino también contra las funciones del agente patógeno. Este método se utilizó para producir una vacuna contra un nematodo que infecta los pulmones del ganado vacuno, la cual se introdujo posteriormente en el mercado comercial. El método se está estudiando actualmente en Sri Lanka a través de un PCI cuya finalidad es producir una vacuna irradiada contra un nematodo que infecta al ganado ovino y caprino en todo el mundo.

185. Los avances técnicos recientes han posibilitado el uso de haces de electrones y otros métodos de irradiación para inactivar agentes patógenos, gracias a lo cual se han podido dejar de utilizar sustancias radiactivas para producir vacunas irradiadas mediante radiación gamma.

186. Además, el uso de sustancias radioprotectoras novedosas, como los iones de manganeso (Mn<sup>2+</sup>) y la trealosa, ha permitido preservar mejor durante la inactivación por irradiación las moléculas de los agentes patógenos responsables de la inmunidad.

<sup>25</sup> Cattoli, G., Ulbert, S. and Wijewardana, V., Editorial: Irradiation Technologies for Vaccine Development, *Frontiers in Immunology*, 9 January 2023.

<sup>26</sup> Alessio Bortolami, et al., Protective Efficacy of H9N2 Avian Influenza Vaccines Inactivated by Ionizing Radiation Methods Administered by the Parenteral or Mucosal Routes, *Frontiers in Veterinary Science*, Vol. 9, 11 July 2022.

187. La innovación tecnológica también ha mejorado los procesos de producción de vacunas irradiadas. Un ejemplo de ello es el empleo de una capa delgada y continua de líquido en la producción de la vacuna inactivada por haz de electrones que desarrolló el Fraunhofer Institute de Alemania y que se está estudiando ahora en Túnez en el marco de un PCI para producir una vacuna irradiada contra un nodavirus que afecta a la lubina.



*Fig. I.2. Unos científicos de Sri Lanka evalúan la respuesta inmunitaria en una cabra vacunada con una vacuna irradiada contra Haemonchus contortus, un nematodo que puede tener efectos devastadores en rebaños de ovejas y cabras y causar enormes pérdidas económicas. (Fotografía: T. Anupama/Universidad de Peradeniya (Sri Lanka))*

## **I.2. Uso combinado de la tecnología nuclear basada en sondas de neutrones de rayos cósmicos y las imágenes de teledetección para la gestión del agua para uso agrícola**

### **Situación**

188. Tres mil millones de personas que viven en regiones agrícolas sufren un grado elevado o muy elevado de escasez de agua. Según las proyecciones actuales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para 2050 alrededor del 57 % de la población mundial podría sufrir escasez de agua durante al menos un mes al año. El cambio climático aumentará ese problema aún más, ya que las condiciones meteorológicas extremas repercuten en la disponibilidad de agua para la producción agrícola por medio de sequías o inundaciones. Por lo tanto, es fundamental tener acceso a información exacta y precisa sobre cómo afectan esos efectos extremos a la humedad del suelo y la productividad hídrica de los cultivos.

189. La monitorización de la humedad del suelo es esencial no solo para la gestión del riego, sino también para la modelización hidrológica, la recarga de agua subterránea y la previsión de inundaciones y sequías. Los métodos convencionales y nucleares permiten evaluar con precisión la humedad del suelo

en niveles localizados (por ejemplo, en un lugar concreto de una parcela), mientras que la tecnología de teledetección proporciona datos detallados a mayor escala.

190. En los últimos diez años se han producido importantes avances en el desarrollo de la sonda de neutrones de rayos cósmicos. El Organismo, a través del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, ha liderado esta innovación con un PCI titulado “Mejora de la resiliencia agrícola y la seguridad del abastecimiento de agua mediante el uso de la sonda de neutrones de rayos cósmicos”. Este PCI pretende hacer frente al desafío que plantea la medición exacta de la humedad del suelo, salvando la brecha que existe entre las imágenes satelitales de gran alcance y los sensores puntuales sobre el terreno a fin de lograr una gestión eficaz del uso del agua agrícola. El funcionamiento de la sonda de neutrones de rayos cósmicos se basa en la detección de los neutrones de baja energía cerca de la superficie del suelo, que permite monitorizar la humedad del suelo en zonas extensas, de hasta 40 hectáreas. El perfeccionamiento de esta tecnología la ha vuelto más accesible y rentable tanto para los responsables de la toma de decisiones como para las comunidades agrícolas. Como consecuencia de ello, su adopción se está expandiendo con rapidez entre diversas partes interesadas.

191. Para maximizar el impacto de la asistencia que presta el OIEA a los Estados Miembros por conducto del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, el Director General del OIEA, Sr. Grossi, junto con el Director General de la FAO, Sr. Qu Dongyu, puso en marcha la iniciativa Atoms4Food durante el Foro Mundial de la Alimentación de 2023, celebrado en Roma en octubre (figura I.3). Esta iniciativa, en combinación con nuevas actividades de investigación y desarrollo, está encaminada a afrontar los desafíos que plantean las crecientes necesidades en materia de seguridad alimentaria y a mejorar la resiliencia ante el cambio climático en todo el mundo.



*Fig. I.3. El 18 de octubre de 2023, Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA, y QU Dongyu, Director General de la FAO, pusieron en marcha la iniciativa Atoms4Food durante el Foro Mundial de la Alimentación, celebrado en Roma. (Fotografía: OIEA)*

## Tendencias

192. Hasta hace poco, la mayoría de las sondas de neutrones de rayos cósmicos se basaban en el uso de tubos contadores proporcionales, que habitualmente emplean gases como el helio 3 o el trifluoruro de boro 10. Esos tubos contadores presentan una alta sensibilidad a los neutrones (el indicador indirecto de la humedad del suelo), pero son relativamente costosos, lo que dificulta la transferencia de esta tecnología a escala mundial. Sin embargo, actualmente las instituciones de investigación y las empresas comerciales están utilizando o probando detectores basados en el litio y en determinados plásticos y materiales metálicos, lo que ha hecho que el precio de este tipo de detectores se reduzca considerablemente desde que se desarrollaron, a principios del siglo XXI.

193. En la actualidad, la tecnología de la sonda de neutrones de rayos cósmicos se emplea en combinación con imágenes de teledetección de alta resolución. La combinación de técnicas nucleares y digitales permite monitorizar semanalmente la humedad del suelo en grandes extensiones de terreno o a nivel de cuencas hidrográficas. Esta tecnología puntera puede revolucionar el uso de la teledetección para la irrigación climáticamente inteligente, lo que mejoraría considerablemente el acceso que tienen los responsables de la toma de decisiones y las comunidades agrícolas a información de referencia. Esto fomentaría el uso sostenible de los recursos hídricos en la agricultura y contribuiría a avanzar hacia la meta 6.4 de los ODS, que aspira a aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos y el abastecimiento de agua dulce.

194. Esta combinación de técnicas nucleares y digitales se aplica ahora por vez primera en países de todo el mundo para contribuir a conservar los recursos hídricos en aras de la producción sostenible de alimentos. En África, la tecnología se ha implantado en 23 países que representan los principales tipos de uso de la tierra del continente y sus principales zonas climáticas, especialmente las que padecen sequías. Además, esta labor abre las puertas a un abanico de posibles aplicaciones en el ámbito de la investigación ambiental, como la validación de los datos de teledetección, los análisis de tendencias en cuanto a la humedad del suelo, la modelización de la productividad hídrica de los cultivos y los cambios en la disponibilidad de agua en los humedales.



*Fig. I.4. Sonda de neutrones de rayos cósmicos instalada en los humedales altoandinos de Bolivia para estudiar la función de estos como reguladores del agua en condiciones de cambio climático. (Fotografía: T. Franz, Universidad de Nebraska-Lincoln)*

195. En el Estado Plurinacional de Bolivia, se instaló una sonda de neutrones de rayos cósmicos en los humedales altoandinos, a unos 4500 metros sobre el nivel del mar (figura I.4). Estos humedales están cerca de las nieves perpetuas de la montaña Huayna Potosí, de 6088 metros de altura, en la cordillera Real, la cual, debido al cambio climático, ha perdido más de un tercio de la capa de hielo que la cubre, lo que ha afectado al abastecimiento de agua de millones de bolivianos. El dispositivo ayudará a los científicos a estimar la capacidad de almacenamiento de agua de los humedales y predecir la probabilidad de sequías y su alcance, y, con ello, a ayudar a los responsables de la toma de decisiones a elaborar políticas de adaptación al cambio climático.



*Fig. I.5. Curso de capacitación sobre el uso de sondas de neutrones de rayos cósmicos impartido en Seibersdorf (Austria), en el marco del proyecto regional de cooperación técnica RAF5086, titulado “Promoción de la agricultura sostenible en condiciones climáticas cambiantes mediante la tecnología nuclear (AFRA)”. (Fotografía: OIEA)*

196. Mediante programas de capacitación y la transferencia de tecnología, el Organismo, por conducto del Centro Conjunto FAO/OIEA, pretende optimizar y reforzar la capacidad de los países para utilizar esta técnica nuclear a fin de que logren usar de manera sostenible sus recursos hídricos para la seguridad alimentaria (figura I.5).

197. El 29 de diciembre de 2023, el OIEA y la Argentina firmaron un memorando de entendimiento con el objetivo de aumentar la cooperación en el ámbito de la alimentación y la agricultura mediante la iniciativa Atoms4Food, puesta en marcha recientemente (figura I.6). En el memorando de entendimiento se han definido cuatro esferas prioritarias, que abarcan la tecnología de irradiación de alimentos, la sanidad animal, la técnica del insecto estéril y la determinación de carbono renovable en productos biobasados.



*Fig. I.6. El 29 de diciembre de 2023, el Sr. Grossi (derecha), Director General del OIEA, y el Prof. Fernando Vilella, Director de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, firmaron un memorando de entendimiento entre el OIEA y la Subsecretaría de Alimentos, Bioeconomía y Desarrollo Regional de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Argentina sobre la cooperación en la esfera de la iniciativa Atoms4Food.  
(Fotografía: OIEA)*

## **J. Tecnología radioisotópica y de la radiación**

### **J.1. Sistemas novedosos de administración de radiofármacos con direccionamiento celular**

#### **Situación**

198. El uso de radiofármacos es un método seguro y eficaz para administrar radionucleidos a órganos, tejidos o dianas celulares de interés, con fines diagnósticos o terapéuticos. Los radionucleidos deberían administrarse a la diana específica y permanecer en ella solo durante el tiempo estrictamente necesario según los requisitos clínicos, de forma que se evite la acumulación y la exposición innecesaria a la radiación en los tejidos sanos. El radioyodo, que se emplea para el diagnóstico y el tratamiento de tiroidopatías desde principios de la década de 1940, fue el primer radionucleido que se utilizó de esta manera. Además, el fluoruro de sodio marcado con flúor 18 y los cloruros de radio 223/estroncio 89 que se utilizan en imagenología ósea y en la terapia con radionucleidos para la metástasis ósea, respectivamente, son otros ejemplos similares de diseño de radiofármacos simple. Sin embargo, el uso de radiofármacos se vuelve más complejo cuando los diseños implican distintos radionucleidos que deben marcarse con diversos tipos de vectores, como pequeñas moléculas, péptidos, anticuerpos y fragmentos de estos, los cuales pueden reconocer con precisión dianas celulares expresadas en células cancerosas<sup>27</sup> (figura J.1).

---

<sup>27</sup> Bodei L., Herrmann K., Schöder H., Scott A. M. and Lewis J. S. Radiotheranostics in oncology: current challenges and emerging opportunities. *Nature Reviews Clinical Oncology* 19, 534–550 (2022).

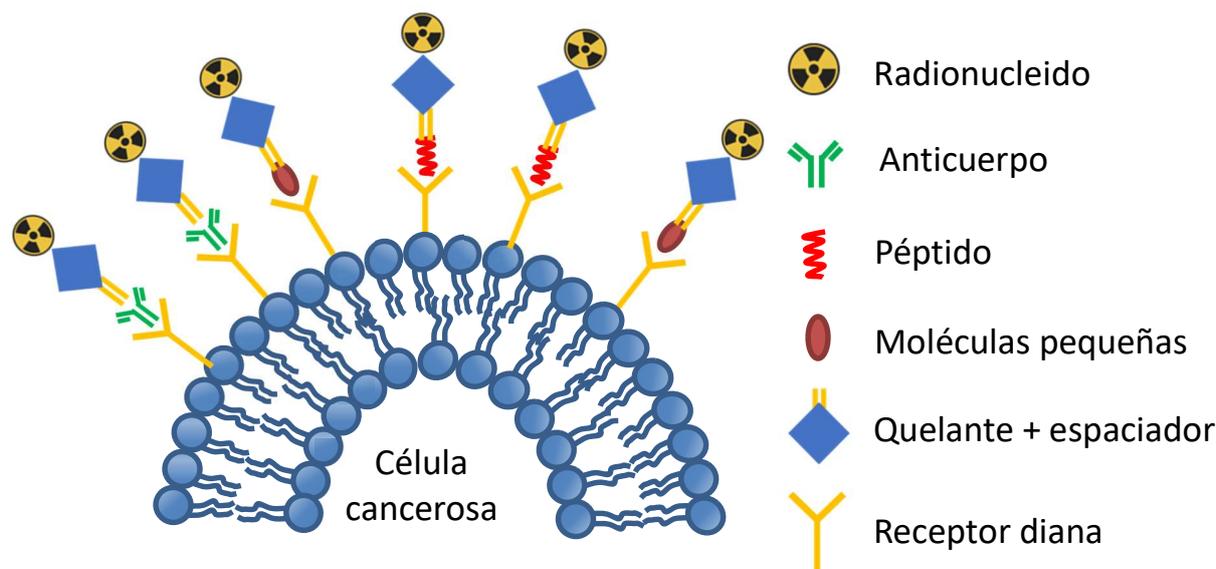


Fig. J.1. Representación esquemática de diseños de radiofármacos. (Gráfico: OIEA)

199. Actualmente, los radiofármacos han demostrado su utilidad clínica no solo para la imagenología funcional de órganos, sino también para la visualización no invasiva de células cancerosas por medio de radiofármacos diseñados para dianas específicas. Este avance permite crear tratamientos personalizados que emplean medicamentos novedosos, entre los que se incluyen agentes inmunoterapéuticos y radiofármacos terapéuticos, como los aprobados recientemente para los cánceres de próstata y neuroendocrinos<sup>28</sup>. Se puede hacer un seguimiento del tratamiento ulterior utilizando radiofármacos de diagnóstico.

200. Gracias a los avances técnicos y a las redes de colaboración existentes en muchos países, hay cada vez más disponibilidad de radionucleidos que tienen propiedades físicas adecuadas para el diagnóstico por la imagen o el tratamiento<sup>29</sup>. La investigación biomédica también está contribuyendo al desarrollo de moléculas que podrían utilizarse para el marcado isotópico de nuevas dianas celulares de enfermedades concretas y adelantos preclínicos. No obstante, existen dificultades para su traslación clínica, debido a diversos desafíos relacionados con barreras biológicas e interacciones a nivel celular que provocan degradación, metabolismo y reacciones no deseadas que causan toxicidad. La optimización de las fórmulas de los radiofármacos se vuelve más compleja cuando se trata de radionucleidos que se desintegran emitiendo partículas beta y alfa y electrones Auger, de corto alcance, sin las correspondientes emisiones gamma adecuadas para la imagenología.

## Tendencias

201. Una manera de salvar esos desafíos que plantean los radiofármacos consiste en utilizar sistemas de administración similares a los que se emplean en el caso de los fármacos no radioactivos y las vacunas. Se están estudiando exhaustivamente los nanosistemas de administración, incluidos los nanosistemas teranósticos, con diversas permutaciones y combinaciones de modalidades de obtención de imágenes, medicamentos y radionucleidos a fin de mejorar la seguridad y eficacia de los medicamentos. En los sistemas biológicos, muchos de los mecanismos celulares internos tienen lugar de forma natural a escala nanométrica ( $10^{-9}$  m). Por lo tanto, se espera que la administración de nanopartículas traiga consigo

<sup>28</sup> Página web de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos de América: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/daf/index.cfm>

<sup>29</sup> Primer resumen publicable de PRISMAP (PRISMAP, 2022): [https://www.prismap.eu/members/repository/Public/Publishable\\_summaries/PRISMAP\\_PubSum\\_1.pdf](https://www.prismap.eu/members/repository/Public/Publishable_summaries/PRISMAP_PubSum_1.pdf)

numerosas ventajas, como una mejor concentración del radionucleido terapéutico en la diana con menos efectos secundarios<sup>30</sup>, mediante la modificación de la farmacocinética de los medicamentos. Los sistemas de administración de nanopartículas comprenden distintos diseños, como dendrímeros, liposomas, micelas, nanocápsulas y nanoesferas, así como diferentes tipos de nanopartículas, entre las que se encuentran las inorgánicas, las poliméricas y las lipídicas sólidas<sup>31</sup> (figura J.2).

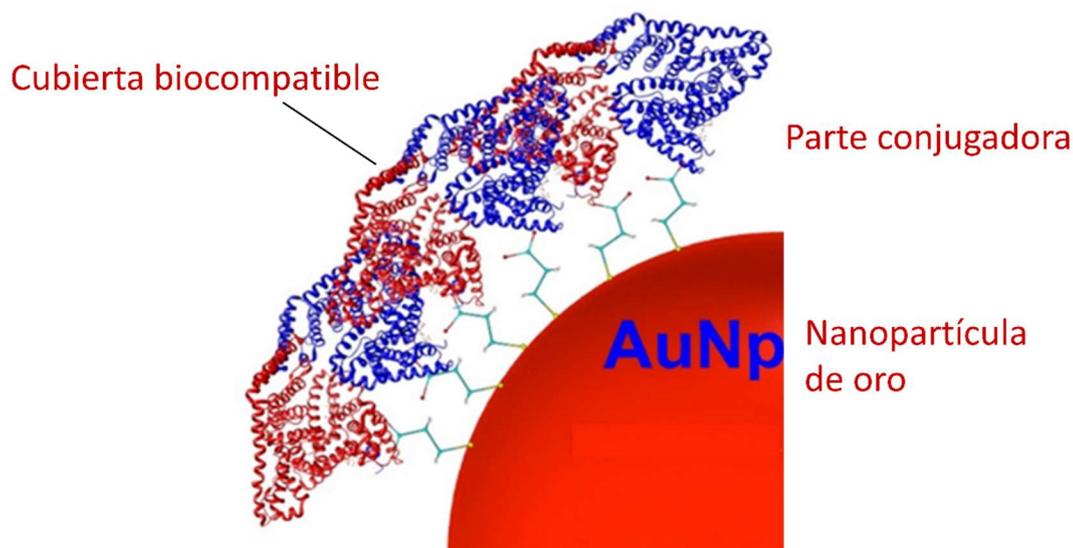


Fig. J.2. Esquema de una nanopartícula de oro (Au) conjugada empleada en el desarrollo de radiofármacos. (Gráfico: OIEA)

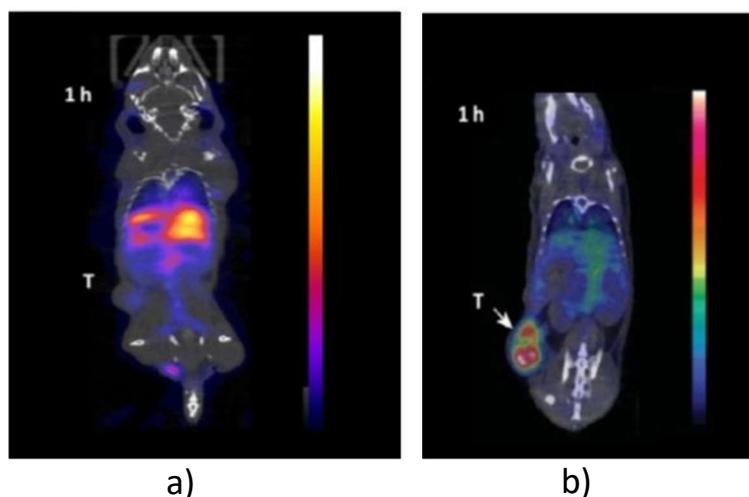
202. Muchos radiofármacos que se encuentran actualmente en la fase de evaluación preclínica están basados en anticuerpos, proteínas o nanomedicamentos que pueden actuar sobre el microambiente tumoral de forma activa o pasiva. Se están desarrollando mejores sistemas de administración como medio para explorar el potencial oculto de la terapia dirigida con radionucleidos. La química de clics y la química bioortogonal, que recibieron gran atención tras la concesión del Premio Nobel de Química 2022 a investigadores que desarrollaban su labor en estos campos, también se han aplicado a la radioquímica y los sistemas de administración, principalmente para la administración eficaz de radioinmunoconjugados (radionucleidos diagnósticos o terapéuticos combinados con sustancias inmunizantes específicas)<sup>32</sup>.

203. Todos estos sistemas de administración dirigida pueden combinarse con métodos de premarcado, tratamientos de quimioterapia combinada o radiosensibilizadores. Los métodos de premarcado pueden revolucionar las estrategias de la teranóstica moderna, ya que pueden aumentar las relaciones diana/fondo hasta 150 veces en los períodos iniciales, como se muestra en la figura J.3. Los resultados preliminares parecen indicar que estos métodos son mejores incluso que los métodos convencionales basados en terapias dirigidas con radionucleidos. La mayor rapidez con que se obtienen relaciones diana/fondo más elevadas y la acumulación previa de anticuerpos permiten utilizar radionucleidos con períodos de semidesintegración cortos, lo que reduce las posibilidades de que se vea expuesto a la radiación el tejido sano.

<sup>30</sup> Jani, P. Subramanian, S., Korde, A., Rathod, L. and Sawant, K. Theranostic Nanocarriers in Cancer: Dual Capabilities on a Single Platform. Functional Bionanomaterials Nanotechnology in the Life Sciences, 293 Thangadurai, D. et al. Functional Bionanomaterials. Nanotechnology in the Life Sciences, 293–310 (2020).

<sup>31</sup> Jalilian, A. R., Ocampo-García, B. et al. IAEA Contribution to Nanosized Targeted Radiopharmaceuticals for Drug Delivery, Pharmaceutics 14, 1060 (2022).

<sup>32</sup> Kondengadan, S. M., Bansla, S., Yang, C. et al. Click chemistry and drug delivery: A bird's-eye view. Acta Pharmaceutica Sinica B 13, 1990 (2023).



*Fig. J.3. Visualización de imágenes de radioinmunodetección del anticuerpo monoclonal CC49 dirigido a la glicoproteína asociada a tumores 72 utilizando el método convencional a) y el método de premarcado b) para administrar con eficacia el radiofármaco. (Fuente: Pharmaceuticals 15, 685 (2022)<sup>33</sup>)*

204. Las actividades futuras del Organismo tendrán por objetivo reunir a expertos multidisciplinarios de este ámbito para determinar cuáles son los sistemas más prometedores, señalar los desafíos conexos y encontrar soluciones para la traslación clínica de estos avances. Se ha planificado un PCI para 2025 cuya finalidad es ayudar a los Estados Miembros a prepararse para la adopción fluida de estos avances encaminados a la administración eficaz de los radiofármacos. El intercambio de conocimientos y la transferencia de tecnología en el seno del Organismo reviste gran importancia en este sentido.

## **J.2. Empleo de la tecnología de radiotrazadores y los humedales artificiales para recuperar las aguas residuales de la minería**

### **Situación**

205. Aunque las industrias minera y de procesamiento de los minerales contribuyen en gran medida a la economía mundial, también se sabe que tienen efectos negativos sobre el medio ambiente. El vertido directo al medio ambiente de aguas residuales de la minería que contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos no solo contamina el medio ambiente, sino que también es un desperdicio de los cada vez más escasos recursos hídricos. Por lo tanto, el reciclaje y la reutilización son fundamentales para desarrollar una economía circular en la industria del procesamiento de los minerales.

206. Los sistemas convencionales de tratamiento de las aguas residuales adolecen de grandes limitaciones en cuanto a su capacidad para eliminar contaminantes de difícil eliminación presentes en distintos tipos de aguas residuales, así como en relación con la acumulación, el tratamiento y el vertido de lodos. Los sistemas convencionales, además de sufrir averías frecuentes como consecuencia de fallos mecánicos o de un manejo incorrecto, son costosos, y para su construcción, su explotación y su mantenimiento se requiere personal con amplios conocimientos técnicos. En los últimos decenios, el Organismo ha facilitado aplicaciones industriales de la tecnología de radiotrazadores para el examen

---

<sup>33</sup> García-Vázquez, R., Battisti, U. M. and Herth, M. M. Recent Advances in the Development of Tetrazine Ligation Tools for Pretargeted Nuclear Imaging. *Pharmaceuticals* 15, 685 (2022).

minucioso de distintas instalaciones de tratamiento de aguas residuales, como mezcladores, tanques de aireación, clarificadores, digestores y unidades de sedimentación y filtración.



*Fig. J.4. Aguas residuales generadas por la actividad minera, mina de El Valle-Boinás, Belmonte de Miranda (Asturias, España). (Fuente: Adobe Stock)*

207. La tecnología de radiotrazadores desempeña un papel importante en la industria del procesamiento de los minerales, ya que se utiliza para estudiar los procesos en plantas industriales y solucionar los problemas que puedan presentar, lo que conduce a una mayor optimización. Aunque esta tecnología cuenta con un amplio abanico de aplicaciones industriales, entre sus principales usuarios se encuentran la industria petrolífera, la petroquímica, la de procesamiento de los minerales y la de tratamiento de las aguas residuales. La tecnología de radiotrazadores implica el uso de fuentes radiactivas selladas, fuentes radiactivas abiertas o sistemas de control nucleónico, por separado o en combinación, dependiendo del problema de que se trate. En el caso de la tecnología de radiotrazadores con fuentes abiertas, que se emplea habitualmente en análisis hidrodinámicos, se inyecta un trazador radiactivo en un sistema industrial. La actividad del trazador se mide a la salida del sistema mediante detectores de radiación y un sistema integrado de adquisición de datos, que generan una curva de distribución de tiempos de residencia que puede proporcionar información importante sobre la circulación de fluidos.

208. Aunque la tecnología de radiotrazadores ha contribuido a mejorar la eficiencia de las estaciones depuradoras convencionales de aguas residuales, se siguen demandando métodos alternativos que sean más fáciles de construir, utilizar y mantener. Eso ha dado lugar a nuevos avances en el tratamiento de las aguas residuales que aspiran a superar esas dificultades persistentes.

209. Los humedales artificiales representan una alternativa interesante a las estaciones depuradoras convencionales de aguas residuales. Se trata de sistemas técnicos diseñados para aprovechar las

funciones naturales de las plantas, suelos y poblaciones microbianas de un humedal con el fin de tratar los contaminantes presentes en las aguas superficiales o subterráneas o en los flujos de desechos. Son sistemas eficaces en función del costo y respetuosos con el medio ambiente debido a su bajo consumo de energía y a su sencilla infraestructura mecánica. Como consecuencia, en los últimos cinco decenios los humedales artificiales se han perfilado como una tecnología de tratamiento fiable, adecuada para todo tipo de aguas residuales, incluidas las aguas negras, los efluentes industriales y agrícolas, los lixiviados de vertederos y las escorrentías pluviales. A pesar de las ventajas que ofrecen los humedales artificiales frente a las estaciones depuradoras convencionales de aguas residuales, el conocimiento y la comprensión de su compleja hidrodinámica siguen sin conocerse ni comprenderse lo suficiente, lo que dificulta la explotación eficiente y la optimización del proceso de tratamiento. Para subsanar esta carencia, el Organismo ha puesto en marcha un PCI destinado a desarrollar un método basado en radiotrazadores para el análisis de los humedales artificiales, establecer protocolos y directrices pertinentes y validar modelos de flujo para los humedales artificiales.



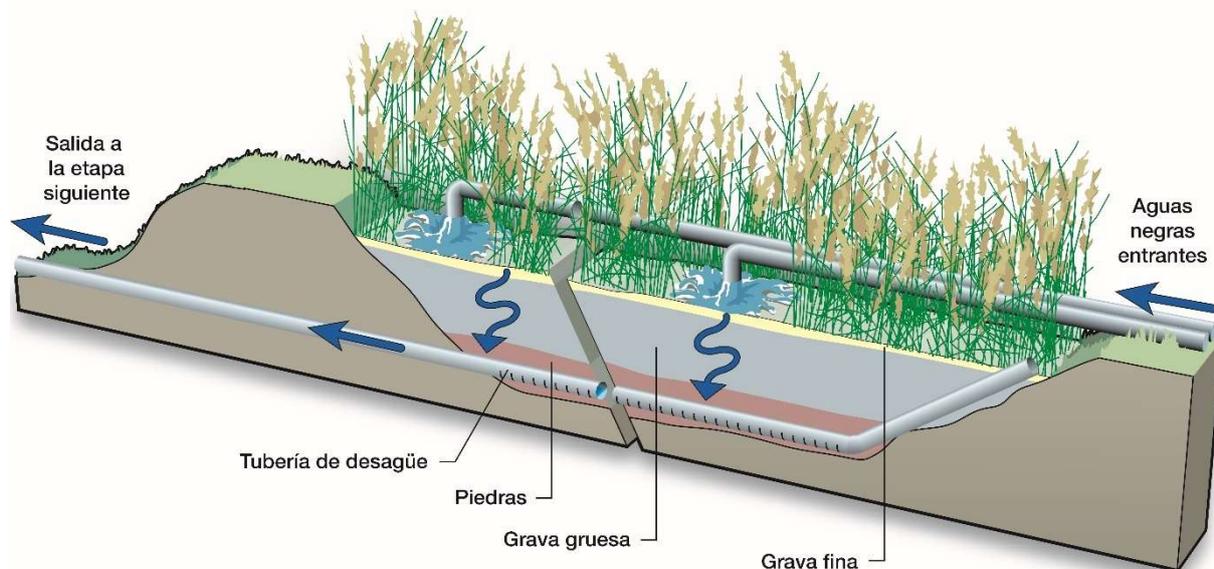
*Fig. J.5. Sistema convencional de tratamiento de las aguas residuales, Belarús.  
(Fuente: OIEA, gráfico de Graphithèque/Adobe Stock modificado)*

## **Tendencias**

210. Se espera que la industria minera crezca en el futuro próximo, a medida que sigue aumentando la demanda de nuevas tecnologías que dependen de materiales esenciales. Los planes de recuperación y cierre de las minas, que dependen de unos recursos hídricos cada vez más escasos, son importantes para que la actividad minera culmine de forma satisfactoria. Estos planes contemplan todos los posibles problemas asociados tanto a la mina como a su estación depuradora de aguas residuales, y es posible que incluyan alguna actividad de tratamiento de las aguas posterior al cierre, además de actividades de muestreo a largo plazo. El modelo de la economía circular también ha concitado atención recientemente

como forma de abordar este complejo escenario, ya que fomenta la adopción de nuevas tecnologías y estrategias de procesamiento.

211. Es sobradamente conocida la eficacia de la utilización de humedales artificiales para eliminar diversos contaminantes. No obstante, la investigación sobre los humedales artificiales se ha centrado principalmente en los procesos de tratamiento biológicos y químicos, utilizando pruebas de “caja negra” que comparan las concentraciones de los contaminantes en el caudal de entrada y el de salida, sin prestar atención a la importancia que revisten las características del flujo —un mecanismo clave de transporte y eliminación de contaminantes— en relación con el rendimiento global del sistema.



*Fig. J.6. Diagrama esquemático de un humedal artificial. (Fuente: OIEA, gráfico de Graphithèque/Adobe Stock modificado)*

212. Se está elaborando un nuevo PCI del Organismo sobre el rendimiento hidráulico de los humedales artificiales para la recuperación de las aguas residuales de la minería, cuya finalidad es investigar, utilizando tecnología de libre acceso de radiotrazadores, los parámetros de diseño relacionados con los procesos hidráulicos y la interdependencia existente entre los procesos hidráulicos y los procesos de calidad del agua. Este PCI tendrá por objeto desarrollar modelos y herramientas que, mediante el suministro de información espacial y temporal detalladas, optimicen la eficacia de la eliminación de contaminantes en los humedales artificiales, así como predecir la respuesta dinámica de un humedal en diversas condiciones. Los protocolos y directrices relativos al uso de radiotrazadores en los humedales artificiales, que se formularon en un PCI existente, serán un recurso muy valioso para el nuevo PCI.

## **K. Hidrología isotópica**

### **K.1. Seguimiento del ciclo del agua: nuevos avances en el análisis del tritio**

#### **Situación**

213. El tritio es el único isótopo radiactivo que se incorpora a la molécula de agua, por lo que resulta un valioso trazador de los procesos del ciclo del agua. Debido a la brevedad de su período de semidesintegración (12,3 años), se utiliza principalmente en hidrología para estimar la recarga de agua subterránea y evaluar la vulnerabilidad a la contaminación. El tritio se produce de forma natural en las

capas superiores de la atmósfera a través de la interacción de los rayos cósmicos con el nitrógeno 14, a una velocidad de unos 258 gramos por año. También se genera como subproducto de la industria nuclear en cantidades comparables a las procedentes de fuentes naturales.

214. Durante el período comprendido entre 1945 y 1963, se liberaron a la atmósfera más de 500 kilogramos de tritio como resultado de los ensayos atmosféricos de dispositivos termonucleares, lo que provocó un aumento mundial de la cantidad de tritio de varios órdenes de magnitud por encima del nivel natural en las precipitaciones. Desde la prohibición de los ensayos atmosféricos, en 1963, los niveles de tritio en el agua atmosférica han decaído lentamente hasta alcanzar niveles estables. Debido a la baja concentración actual de tritio en las aguas naturales, la medición del contenido de este elemento se ha vuelto difícil a nivel técnico. Para obtener mediante contadores de centelleo líquido comerciales un número suficiente de cuentas de decaimientos radiactivos de modo que los resultados sean exactos y precisos y adecuados para aplicaciones hidrológicas fiables, es preciso un enriquecimiento considerable en tritio (concentración previa de 15 a 100 veces superior).

215. El enriquecimiento en tritio suele realizarse mediante celdas electrolíticas alcalinas (AEC) con electrodos de níquel-níquel o acero inoxidable-acero blando, que se diseñaron a principios de la década de 1960. Una prueba de competencia de intercomparación de tritio que tuvo lugar en 2018 y en la que participaron alrededor de 90 laboratorios puso de manifiesto que más del 75 % de los laboratorios de tritio de todo el mundo utilizaban sistemas AEC de acero blando de 250 ml o 500 ml para medir el tritio en las muestras de agua ambiental. Sin embargo, casi la mitad de esos laboratorios obtenían resultados inexactos en caso de niveles bajos y ultrabajos de tritio en las muestras de agua, por lo que esos resultados no eran adecuados para aplicaciones hidrológicas. Las deficiencias se debían a un enriquecimiento insuficiente en tritio o a problemas generales con el procesamiento posterior de los datos.

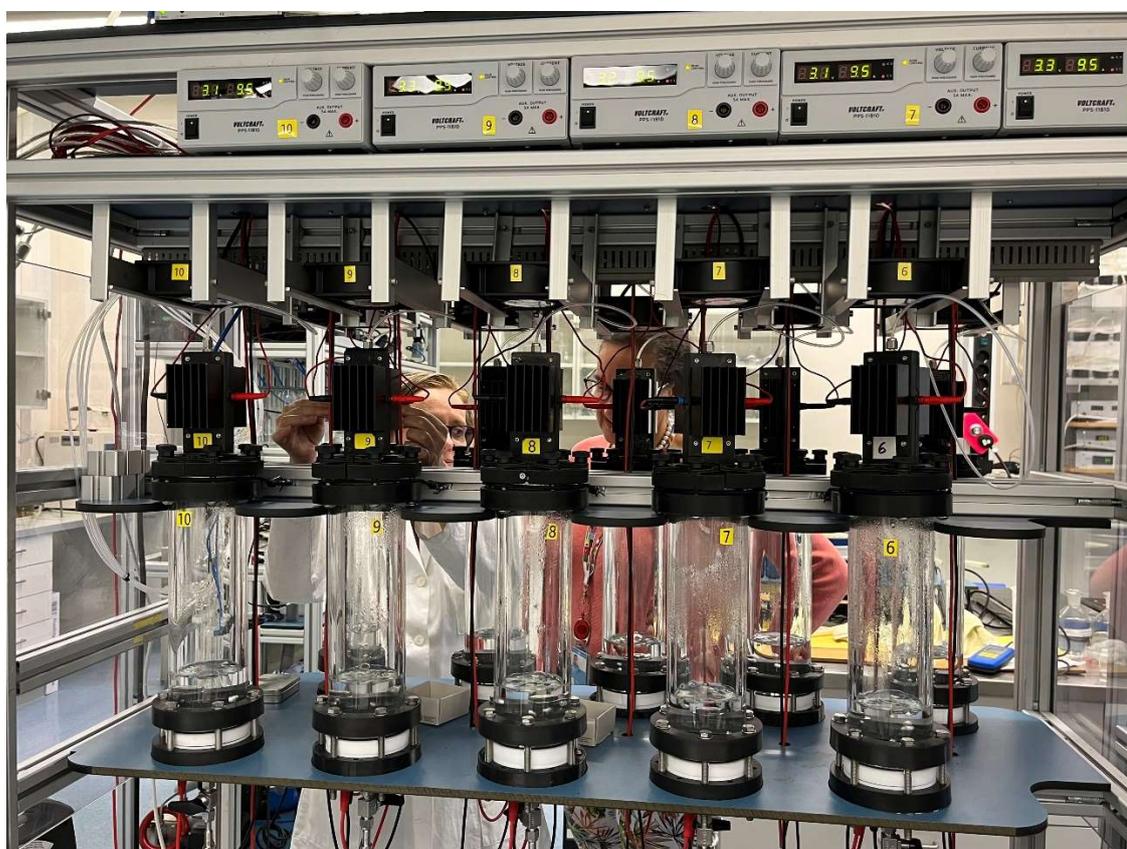


Fig. K.1. El ciclo del agua. (Gráfico: OIEA)

## Tendencias

216. A fin de dar respuesta a la necesidad de un mayor enriquecimiento en tritio, el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo ha desarrollado y sometido a numerosas pruebas un innovador sistema de membranas electrolíticas poliméricas (PEM) para el enriquecimiento en tritio. Este sistema promete revolucionar la capacidad de los Estados Miembros de determinar la concentración de tritio en las muestras de agua a niveles ultrabajos, tanto para fines de vigilancia hidrológica como radiológica.

217. El nuevo sistema de enriquecimiento en tritio puede producir factores elevados de concentración previa (más de 60 veces superior) y evita algunas de las desventajas de los métodos convencionales de enriquecimiento en tritio, como el uso de productos químicos peligrosos de electrólisis y neutralización y de un complejo aparato de electrólisis que requiere exhaustivos controles de refrigeración y temperatura. Además, el nuevo sistema PEM tiene como objetivo simplificar y acortar el procedimiento analítico, de manera que el análisis del tritio sea una tarea mucho más sencilla para los Estados Miembros interesados en utilizarlo como trazador con fines de evaluación y gestión de los recursos hídricos.



*Fig. K.2. Vista frontal del sistema PEM de enriquecimiento en tritio del Organismo, que consta de diez celdas electrolíticas con un conjunto de muestras de referencia para comprobar la exactitud y la precisión. (Fotografía: OIEA)*

218. Los avances en la tecnología de enriquecimiento en tritio ayudarán a refinar la distinción entre las señales naturales y las antropogénicas y aumentarán la disponibilidad de información de referencia sobre el tritio natural.



*Fig. K.3. El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, pronuncia el discurso inaugural del acto de presentación de la Red Mundial de Laboratorios de Análisis del Agua (GloWAL), durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua de 2023, celebrada en Nueva York. (Fotografía: OIEA)*

## **L. Medio ambiente marino**

### **L.1. Inteligencia artificial para mejorar la vigilancia y la investigación de la contaminación por microplásticos en el océano**

#### **Situación**

219. La afluencia de plásticos de origen terrestre al océano ha transformado el medio ambiente marino en un cementerio de desechos plásticos. Los ecosistemas marinos se enfrentan a una crisis cada vez más grave, ya que la afluencia anual de más de 12 millones de toneladas de plásticos de origen terrestre ha provocado una escalada de la contaminación por microplásticos y nanoplásticos en el océano. A fin de hacer frente al extraordinario aumento de la contaminación por plásticos, en el marco de la iniciativa TECnología Nuclear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics) del OIEA se trabaja para vigilar los microplásticos y evaluar su impacto en el medio marino. A pesar de los avances en los conocimientos sobre la contaminación marina por plásticos, sigue siendo difícil cuantificar y caracterizar los microplásticos debido a sus complejos procesos de degradación y a la falta de bases de datos exhaustivas sobre los polímeros. Como parte de su investigación, NUTEC Plastics se encuentra trabajando para crear una base de datos mundial sobre microplásticos en diversos estados de degradación ambiental.

220. El OIEA colabora estrechamente con los Estados Miembros en el desarrollo de plantas piloto para convertir los desechos plásticos en productos valiosos. La Argentina, Filipinas, Indonesia y Malasia han realizado grandes progresos con el objetivo de construir prototipos a escala técnica en 2024, en cooperación con asociados industriales. Las principales y prometedoras aplicaciones se concentran en la obtención de materiales de construcción asequibles, duraderos y de alta calidad, así como en la pirólisis asistida por radiación para producir combustibles y aditivos, y en la mejora de las traviesas del ferrocarril.



*Fig. L.1. En los Laboratorios del OIEA para el Medioambiente Marino, unos científicos analizan las características químicas de los microplásticos presentes en muestras del medio marino mediante espectroscopia vibracional, espectroscopia Raman y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. (Fotografía: OIEA)*

221. Se han utilizado varias técnicas de interacción de fotones con la materia, como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la espectroscopia Raman y la espectroscopia infrarroja directa por láser (LDIR), para la detección de polímeros y microplásticos y su caracterización. En esos métodos se emplean bases de datos que contienen espectros de referencia, con los que se comparan los espectros de partículas obtenidos. Mientras que los espectros de referencia suelen obtenerse a partir de polímeros prístinos, las partículas de las muestras ambientales rara vez permanecen prístinas y a menudo experimentan degradación a causa de factores como la exposición a la luz ultravioleta y la oxidación. La degradación altera las propiedades fisicoquímicas de las muestras ambientales, lo que afecta su interacción con la luz infrarroja y da lugar a perfiles espectrales modificados, de modo que aumenta el riesgo de que se cometan errores en la detección y la caracterización. Dado que sería laborioso y poco práctico compilar una base de datos de espectros de polímeros en distintas fases de degradación, se necesitan enfoques alternativos que combinen técnicas analíticas más rápidas y métodos avanzados de análisis de datos para aprovechar la información existente sobre muestras tanto prístinas como degradadas.

222. En los Laboratorios del OIEA para el Medioambiente Marino, la espectroscopia LDIR ha surgido recientemente como técnica alternativa para el análisis de los microplásticos y los polímeros en las muestras de agua de mar y de sedimentos y biota marinos. A diferencia de técnicas como la espectroscopia FTIR, la espectroscopia LDIR ofrece la ventaja de escanear las muestras antes de generar las imágenes y analizar únicamente las zonas en las que se han detectado partículas. De esta manera, se reduce el tiempo de análisis, sobre todo en el caso de muestras en que la presencia de partículas es mínima. Sin embargo, un inconveniente es la posibilidad de que se analicen erróneamente dos partículas adyacentes como una sola, ya que solo se registra un espectro por partícula. Además, en comparación con otras técnicas como la espectroscopia FTIR, la espectroscopia LDIR es más susceptible de cometer errores cuando se analizan partículas meteorizadas, debido a que los instrumentos LDIR registran una banda infrarroja más estrecha. Por lo tanto, es fundamental que se desarrollen métodos de clasificación más eficaces para minimizar el riesgo de errores de detección y caracterización.

### Tendencias

223. El aprendizaje automático puede ser una herramienta valiosa para mejorar la clasificación, aunque su aplicación en la esfera de la identificación de microplásticos sigue siendo limitada. El aprendizaje automático, que comprende el aprendizaje profundo y el aprendizaje por refuerzo, se ha convertido en parte indisociable de diversos ámbitos científicos y sectores industriales, como la ingeniería biomédica y la investigación sobre el agua. Consiste en entrenar modelos matemáticos para hacer predicciones o tomar decisiones basadas en datos observados, utilizando métodos derivados de la estadística y la informática. Por lo tanto, al aplicar el aprendizaje automático a la detección y la caracterización de polímeros y microplásticos podría mejorar la precisión en entornos ambientales.



*Fig. L.2. El Organismo participa actualmente en un proyecto que tiene como objetivo analizar los microplásticos hallados en muestras de agua de mar y sedimentos recogidas en la Antártida, en colaboración con el Instituto Antártico Argentino. (Fotografía: OIEA)*

224. La inteligencia artificial se perfila como una herramienta fundamental en la esfera de la detección de microplásticos y su caracterización. El empleo por la IA de algoritmos de aprendizaje automático para desentrañar las complejidades de los polímeros degradados en el medio marino representa un cambio de paradigma. La capacidad de generar espectros de polímeros degradados en condiciones ambientales específicas permite a los investigadores distinguir la tipología de los microplásticos con una precisión sin precedentes. Eso no solo facilita la tarea de diferenciar entre las diversas composiciones de los plásticos, sino que también permite los investigadores comprender cabalmente los orígenes de un polímero, así como su comportamiento en diferentes entornos marinos.

225. La IA y la conservación ambiental han convergido en un momento crucial de la actual lucha contra la contaminación marina por plásticos. La rapidez de su análisis espectral, junto con la simulación de procesos físicos, químicos y biológicos para generar espectros de polímeros degradados, hacen de la IA una sofisticada lente a través de la cual ver y superar los complejos desafíos que plantea la contaminación por microplásticos. Mientras se sigue explorando la intersección de la innovación tecnológica y la gestión ambiental, la IA promete ser una herramienta magnífica en la lucha por un océano sin plásticos.

## Anexo

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo<sup>a</sup>

País	Reactores en funcionamiento		Reactores cuyas operaciones están suspendidas		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW(e).h	Porcentaje de participación nuclear
ARGENTINA	3	1 641			1	25	9,0	6,3
ARMENIA	1	416					2,5	31,1
BANGLADESH					2	2 160		
BELARÚS	2	2 220					11,0	28,6
BÉLGICA	5	3 908					31,3	41,2
BRASIL	2	1 884			1	1 340	13,7	2,2
BULGARIA	2	2 006					15,5	40,5
CANADÁ	19	13 699					83,5	13,7
CHINA	55	53 152			24	24 948	406,5	4,9
COREA, REP.DE	26	25 825			2	2 680	171,6	31,5
EGIPTO					3	3 300		
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	3	4 011			1	1 310	31,2	19,7
ESLOVAQUIA	5	2 308			1	440	17,0	61,3
ESLOVENIA	1	688					5,3	36,8
ESPAÑA	7	7 123					54,4	20,3
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	93	95 835			1	1 117	742,4	18,5
FINLANDIA	5	4 394					32,8	42,0
FRANCIA	56	61 370			1	1 630	323,8	64,8
HUNGRÍA	4	1 916					15,1	48,8
INDIA	19	6 290	4	639	8	6 028	44,6	3,1
IRÁN, RÉP. ISL.	1	915			1	974	6,1	1,7
JAPÓN	12	11 046	21	20 633	2	2 653	77,5	5,5
MÉXICO	2	1 552					12,0	4,9
PAÍSES BAJOS, REINO DE	1	482					3,8	3,4
PAKISTÁN	6	3 262					22,4	17,4
REINO UNIDO	9	5 883			2	3 260	37,3	12,5
REP. CHECA	6	3 934					28,7	40,0
RUMANÍA	2	1 300					10,3	18,9
RUSIA	37	27 727			3	2 700	204,0	18,4
SUDÁFRICA	2	1 854					8,2	4,4
SUECIA	6	6 944					46,6	28,6
SUIZA	4	2 973					23,4	32,4
TURQUÍA					4	4 456		
UCRANIA	15	13 107			2	2 070	N/D	N/D
<b>A nivel mundial<sup>b</sup></b>	<b>413</b>	<b>371 539</b>	<b>25</b>	<b>21 272</b>	<b>59</b>	<b>61 091</b>	<b>2 508,7<sup>c</sup></b>	<b>N/A</b>

**Nota:** “N/D”, no disponible; “N/A”, no se aplica.

a Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo ([www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris)), según los datos proporcionados por los Estados Miembros a 16 de junio de 2024.

b Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 2 unidades en funcionamiento, 1874 MW(e) y 17,2 TWh de electricidad suministrada, que representa el 6,9 % de la matriz total de electricidad.

c La producción total de electricidad no incluye a Ucrania, ya que no se presentaron datos operativos correspondientes a 2023.

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

<b>Tipo de aplicación<sup>a</sup></b>	<b>Número de reactores de investigación<sup>b</sup></b>	<b>Número de Estados Miembros que tienen estas instalaciones</b>
Enseñanza/capacitación	162	51
Análisis por activación neutrónica	119	50
Producción de radioisótopos	83	40
Radiografía neutrónica	69	34
Irradiación de materiales/combustible	67	26
Dispersión neutrónica	45	28
Geocronología	25	22
Transmutación (dopado del silicio)	24	15
Transmutación (gemas)	21	12
Terapia neutrónica, principalmente I+D	16	11
Medición de datos nucleares	17	11
Otras <sup>c</sup>	116	35

<sup>a</sup> 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)*.

<sup>b</sup> De un total de 234 reactores de investigación examinados (225 en funcionamiento y 9 en régimen de parada temporal a diciembre de 2023).

<sup>c</sup> 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.

## Lista de abreviaciones y acrónimos

<sup>13</sup> C-SBT	prueba del aliento con sacarosa marcada con <sup>13</sup> C
<sup>99m</sup> Tc-PYP	pirofosfato de tecnecio 99m
AEC	celda electrolítica alcalina
AEFT	análisis de envejecimiento en función del tiempo
AEN de la OCDE	Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos
ARAO	Organismo de Gestión de Desechos Radiactivos de Eslovenia
CFS	Commonwealth Fusion Systems
CIRES	Centro Industrial de Recolección, Almacenamiento y Disposición Final
COVID-19	enfermedad por coronavirus de 2019
CP 28 2023	Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DEMO	central de demostración de la fusión
DTT	Divertor Tokamak Test
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FPGA	matriz de puertas programable <i>in situ</i>
FTIR	espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
GJ	gigajulio
GW	gigavatio
GW(e)	gigavatio (eléctrico)
HPR1000	Hualong 1
HTGR	reactor de alta temperatura refrigerado por gas
HTTR	reactor experimental de alta temperatura
I+D	investigación y desarrollo
IA	inteligencia artificial
IFMIF	Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión
INIR	Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear
INL	Laboratorio Nacional de Idaho
JET	Toro Europeo Común
keV	kiloelectronvoltio
LDIR	espectroscopia infrarroja directa por láser
LFR	reactor rápido refrigerado por plomo
LIDAR	detección y localización por ondas luminosas
LILW	desechos de actividad baja e intermedia
LWR	reactor de agua ligera
MARVEL	Aplicaciones, Investigación, Validación y Evaluación de Microrreactores

MeV	megaelectronvoltio
MHTGR	reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
MMR	microrreactor modular
MSFR	reactor rápido de sales fundidas
MSR	reactor de sales fundidas
MW(e)	megavatio (eléctrico)
NHSI	Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear
NIF	Instalación Nacional de Ignición
NORM	material radiactivo natural
NPPA	Autoridad de Centrales Nucleares
NRAD	reactor de radiografía neutrónica
NRC	Comisión Reguladora Nuclear
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCI	proyecto coordinado de investigación
PEM	membrana electrolítica polimérica
PET	tomografía por emisión de positrones
PRIS	Sistema de Información sobre Reactores de Potencia
PWR	reactor de agua a presión
SCWR	reactor supercrítico refrigerado por agua
SFR	reactor rápido refrigerado por sodio
SMART	reactor modular avanzado integrado
SMR	reactores pequeños y medianos o modulares
SPECT-TC	tomografía computarizada por emisión de fotón único combinada con tomografía computarizada
STEP	Tokamak Esférico para la Producción de Energía
t HM	toneladas de metal pesado
TW · h	teravatio-hora
UKAEA	Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido
UME	uranio muy enriquecido
UPE	uranio poco enriquecido
UPEAC	uranio poco enriquecido de alta concentración
WCR	reactor refrigerado por agua



**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](mailto:Official.Mail@iaea.org)  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)