



# Examen de la Tecnología Nuclear de ■ 2022

Informe del Director General



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

*Átomos para la paz y el desarrollo*

GC(66)/INF/4



# Examen de la Tecnología Nuclear de 2022

## Informe del Director General

GC(66)/INF/4

Impreso por el OIEA en Austria  
Septiembre de 2022  
IAEA/NTR/2022





## Índice

Prefacio.....	5
Prefacio del Director General.....	6
Resumen ejecutivo .....	7
A. Energía nucleoelectrica .....	11
A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrica.....	11
A.2. Centrales nucleares en funcionamiento .....	12
A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansión .....	16
A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica .....	19
A.4.1. Reactores refrigerados por agua avanzados.....	20
A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares, incluidos reactores de alta temperatura.....	22
A.4.3. Reactores rápidos.....	24
A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica.....	25
A.4.5. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión nuclear para la producción de energía en el futuro .....	26
B. Ciclo del combustible nuclear .....	30
B.1. Parte inicial .....	30
B.2. Parte final .....	32
C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos .....	34
C.1. Clausura .....	34
C.2. Rehabilitación ambiental .....	37
C.3. Gestión de desechos radiactivos .....	38
D. Reactores de investigación y aceleradores de partículas .....	41
D.1. Reactores de investigación.....	41
D.2. Aceleradores de partículas e instrumentación.....	43
E. Datos atómicos y nucleares.....	46
F. Medio ambiente.....	46
F.1 Tecnologías de la radiación para luchar contra la contaminación por plásticos.....	47
F.2 Técnicas nucleares e isotópicas para luchar contra la contaminación por plásticos en el medio marino.....	48
G. Alimentación y agricultura .....	52
G.1 Marcación isotópica innovadora para evaluar y mitigar la persistencia y el transporte de antibióticos y sus repercusiones en la resistencia a los antimicrobianos .....	52
G.2 Variación genética inducida por el espacio, fitomejoramiento y astrobiología para luchar contra el cambio climático.....	54
H. Salud humana .....	57
H.1 Teranóstica: una hoja de ruta para la atención personalizada del cáncer .....	57
H.2 Avances en la ciencia de la nutrición: ayudar a los países a emplear datos para hacer frente a la epidemia de obesidad.....	58
I. Radioisótopos y tecnología de la radiación.....	61
I.1. Nuevas vías para la producción de radioisótopos de uso médico .....	61

J. Inteligencia artificial para las ciencias y las aplicaciones nucleares.....	63
Anexo .....	66

## Prefacio

- 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 2021.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2022* trata sobre los siguientes temas: la energía nucleoelectrica, el ciclo del combustible nuclear, la clausura, la rehabilitación ambiental y la gestión de desechos radiactivos, los reactores de investigación y los aceleradores de partículas, los datos atómicos y nucleares, el medio ambiente, la alimentación y la agricultura, la salud humana, los radioisótopos y la tecnología de la radiación, y la inteligencia artificial para las ciencias y las aplicaciones nucleares.
- El borrador se presentó en la reunión de la Junta de Gobernadores de marzo de 2022 en el documento GOV/2022/2. Esta versión final se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones celebradas durante la Junta de Gobernadores, así como los comentarios recibidos por los Estados Miembros.

## Prefacio del Director General

El cambio climático, la contaminación atmosférica, la seguridad energética, la seguridad alimentaria, la contaminación por plásticos, el cáncer y la obesidad son algunos de los numerosos desafíos globales que enfrenta la comunidad mundial.

Para abordarlos debemos utilizar todas las herramientas de que disponemos.

Las tecnologías nucleares, combinadas con otras tecnologías, ayudan a los Estados Miembros a tomar decisiones fundamentadas sobre la forma adecuada de proceder, ya sea con respecto al uso de la inteligencia artificial para todo lo relacionado con el ámbito nuclear, a la producción de energía fiable y con bajas emisiones de carbono, a la ayuda para comprender y combatir la contaminación por plásticos o salvar vidas mediante una mejor atención oncológica y una mejor nutrición.

En la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP26) de 2021, celebrada en Glasgow (Reino Unido), el Organismo contribuyó al debate con su enfoque único basado en la ciencia y en pruebas y mostró la importancia crítica de la tecnología nuclear para luchar contra la crisis climática y manejar eficazmente sus consecuencias, cada vez más graves. A fin de evidenciar el creciente protagonismo de las tecnologías nucleares, el Organismo seguirá participando en el diálogo de alto nivel sobre la energía nuclear y las técnicas y aplicaciones nucleares en la CP27, que se celebrará en Sharm el-Sheikh (Egipto).

En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2022* se resume la situación de algunas esferas clave de la energía nuclear y se destacan avances innovadores y prometedores presentes en ellas.



*Fig. P-1. Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA, visita la Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. (Rodovia Rio-Santos - Itaorna, Angra dos Reis (Brasil))*



## Resumen ejecutivo

1. Por primera vez desde que hace diez años tuvo lugar el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi, el Organismo ha revisado al alza sus proyecciones relativas al posible aumento de la capacidad nucleoelectrica para la generación de electricidad en los próximos decenios. En general, la capacidad nucleoelectrica ha aumentado gradualmente en el último decenio, con la adición de unos 20,7 GW(e) de capacidad debido a la conexión a la red de nuevas unidades y del aumento de capacidad de los reactores existentes.
2. Al final de 2021, la capacidad de energía nucleoelectrica en explotación en el mundo ascendía a 389,5 GW(e), generados por 437 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 32 países. En el transcurso del año se conectaron a la red más de 5,2 GW(e) de capacidad nuclear nueva procedentes de cuatro nuevos reactores de agua a presión en China, los Emiratos Árabes Unidos y el Pakistán, de un reactor de agua pesada a presión en la India y de un reactor de alta temperatura refrigerado por gas en China. En ese mismo período se retiraron permanentemente de la producción 8,7 GW(e) de capacidad nuclear.
3. En total, 26 Estados Miembros se encontraban en diferentes etapas de la preparación de su infraestructura nacional para la implantación de un nuevo programa nucleoelectrico; y se prevé que, para 2035, entre 10 y 12 países en fase de incorporación introducirán la energía nucleoelectrica, lo que incrementaría en un tercio el número de países que disponen de centrales en funcionamiento. Un avance tecnológico importante que llama la atención de los responsables de la planificación energética y los encargados de formular políticas es la disponibilidad y el despliegue previstos para 2030 de varios reactores pequeños y medianos o modulares (SMR) novedosos. En consecuencia, varios países en fase de incorporación al ámbito nuclear han incluido los SMR en sus consideraciones tecnológicas, incluso si se prevé que en los próximos tres decenios el grueso de la nueva capacidad añadida provendrá de reactores avanzados refrigerados por agua de grandes dimensiones. Se necesita infraestructura nucleoelectrica a escala nacional para mantener el mismo grado de atención constante y estricta respecto de los requisitos de seguridad tecnológica nuclear, seguridad física nuclear y salvaguardias de los grandes reactores avanzados y los SMR.
4. Centrales nucleares de todo el mundo siguieron funcionando de manera fiable durante la pandemia de COVID-19, gracias a la aplicación de enfoques operativos innovadores y de medidas específicas para proteger a los trabajadores. Una vez más las centrales nucleares demostraron su capacidad de funcionar de forma resiliente, fiable y versátil en estos tiempos difíciles.
5. La explotación a largo plazo siguió siendo esencial, no solo para la transición a la energía con bajas emisiones de carbono y para cumplir los objetivos de alcanzar unas emisiones netas cero de carbono, sino también a fin de disponer de tiempo para desarrollar nueva capacidad de generación con bajas emisiones, por ejemplo, con nuevas centrales nucleares.
6. Muchos Estados Miembros realizaron avances tangibles en el desarrollo de la tecnología de los SMR para su despliegue a corto plazo. Además de la central nuclear flotante Akademik Lomonosov en la Federación de Rusia, que se ha estado explotando comercialmente desde mayo de 2020, China inició la construcción de un reactor ACP de 125 MW(e). Actualmente se están desarrollando más de 70 diseños de reactores modulares pequeños para aplicaciones eléctricas y no eléctricas. Asimismo, en varios países se intensificaron las actividades de desarrollo para un subconjunto de SMR conocido como microrreactores que se consideran una solución óptima para proporcionar cogeneración de calor y

electricidad en regiones remotas o islas pequeñas, y/o para sustituir los generadores diésel. Para ayudar a que los Estados Miembros lleguen a un entendimiento común de sus necesidades y especificidades en cuanto a la tecnología de los SMR, el Organismo inició un nuevo marco para el desarrollo de requisitos genéricos para los usuarios y criterios para el diseño y la tecnología de los reactores modulares pequeños.

7. El uso de la energía nuclear más allá de la producción de electricidad despierta un interés sin precedentes en todo el mundo. En 2021, se utilizaron 61 reactores nucleares en funcionamiento para aplicaciones no eléctricas (desalación, calefacción urbana y calefacción industrial) a fin de generar aproximadamente 2167 GW·h de equivalente eléctrico del calor para apoyar la cogeneración nuclear, de los cuales 5 apoyaron también la desalación.

8. El proyecto ITER siguió realizando avances en cuanto al ensamblaje de la maquinaria y la planta, a pesar de una presión sin precedentes debida a la pandemia y a las dificultades en la fabricación de algunos componentes del ITER, que son piezas novedosas. Se lograron avances importantes en el ensamblaje y la integración de la maquinaria del ITER. Se pusieron en marcha una serie de iniciativas encaminadas a establecer un marco regulador específico para la fusión, uno de los elementos clave del desarrollo de la fusión como fuente de energía comercialmente viable en el plano nacional.

9. Los bajos precios sostenidos del uranio obligaron a varios productores primarios de uranio a reducir su ritmo de producción, lo que llevó a varios inversionistas, fondos, comerciantes y productores primarios de uranio a comprar octóxido de triuranio ( $U_3O_8$ ) en el mercado en respuesta al cambio previsto en la oferta y la demanda de ese compuesto. Como consecuencia de la disminución de las existencias y la aceleración del comercio de  $U_3O_8$  en 2021, para finales del año el precio al contado había aumentado considerablemente desde el primer trimestre de 2021. Los recientes aumentos de los precios de mercado del uranio incentivaron en 2021 algunas inversiones que han incluido determinadas actividades renovadas de prospección y desarrollo, así como la reanudación de cierta producción primaria.

10. Se prevé que muchas de las cuestiones que han llevado a la parada de instalaciones nucleares en los últimos diez años —factores políticos y económicos, costos de mantenimiento y/o renovación, y las condiciones del mercado eléctrico— sigan existiendo en el futuro; de hecho, es posible que se acelere la tasa de paradas debido al perfil de edad de los parques actuales, compensado en parte por la prolongación de la vida útil. Una gran mayoría de los aproximadamente 300 reactores nucleares de potencia que actualmente tienen 30 años o más pueden ser retirados del servicio en los próximos tres decenios. Se prevé una evolución similar en el caso de los reactores de investigación, ya que estos tienen un perfil de edad muy similar. Las tendencias actuales parecen inclinarse hacia un enfoque de desmantelamiento más inmediato en vez del desmantelamiento diferido, que había sido tradicionalmente la estrategia predilecta.

11. Algunos Estados Miembros avanzaron considerablemente en 2021 hacia las últimas etapas de la disposición final en sus instalaciones de desechos de actividad baja. Por lo que respecta a los programas de repositorios geológicos profundos para desechos de actividad alta, la organización finlandesa de gestión de desechos Posiva inició en 2021 la excavación de los primeros túneles de disposición final en el emplazamiento del repositorio geológico profundo Onkalo. La colaboración internacional sigue aumentando en el ámbito de la gestión de desechos radiactivos, especialmente para los programas de disposición final geológica profunda. En 2021 también se lograron importantes avances en la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso, concretamente en lo que respecta a la recuperación y el acondicionamiento.

12. Siguió aumentando el interés a escala mundial en los reactores de investigación. Además de los 235 reactores de investigación en funcionamiento, en 2021 se estaban construyendo otros 11. Muchos países aprovechan las oportunidades de acceso a los reactores de investigación por medio de iniciativas de colaboración internacionales y regionales. Dos Reactores-Laboratorio por Internet en la República Checa y la República de Corea comenzaron a transmitir experimentos a estudiantes de otros países.

13. Con la aparición de potentes capacidades informáticas e instrumentos de análisis de datos, la industria nuclear está incorporando la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y las técnicas del aprendizaje profundo a una amplia gama de actividades que podrían transformar la manera en que se diseñan, licencian y operan los sistemas nucleares. La inteligencia artificial podría llegar a mejorar la integración de los cálculos y los datos experimentales recopilados en experimentos a pequeña escala o procedentes de sensores durante la explotación. La rápida adopción de sistemas de inteligencia artificial/aprendizaje automático en diversos ámbitos es una tendencia clara que también influirá en gran medida en la física nuclear y en la creación de bibliotecas de datos nucleares.

14. La inteligencia artificial tiene un enorme potencial para acelerar el desarrollo tecnológico en muchos ámbitos de la ciencia nuclear, desde la salud humana hasta la fusión y las ciencias nucleares. La inteligencia artificial permite a los expertos analizar rápidamente enormes cantidades de datos isotópicos relacionados con el agua que se hallan almacenados en redes mundiales y, con ello, ya está ayudando a los científicos a comprender los efectos del cambio climático y del crecimiento demográfico en los recursos hídricos. También puede contribuir a la lucha contra el cáncer y a prepararse mejor para futuros brotes de enfermedades zoonóticas. El uso optimizado de la inteligencia artificial en las ciencias y aplicaciones nucleares exige sólidas alianzas internacionales y una cooperación intersectorial para elaborar orientaciones en materia de reglamentación, cuestiones éticas, enseñanza y capacitación, así como para el intercambio de experiencias, conocimientos y buenas prácticas.

15. La espectrometría de masas con aceleradores (AMS) ha demostrado ser una técnica ultrasensible con gran potencial para aplicaciones analíticas relacionadas con los problemas de la sociedad moderna. La AMS se utiliza actualmente en arqueología, aplicaciones biomédicas, estudios sobre el cambio climático, hidrología, oceanografía y muchos otros ámbitos de creciente interés social y económico. Los recientes avances tecnológicos han ampliado también el ámbito de sus aplicaciones, lo que ha permitido el estudio de una amplia gama de objetos del patrimonio cultural y natural, así como la detección de falsificaciones y del comercio ilícito de productos.

16. Las tecnologías de la radiación innovadoras aplicables al reciclaje y las técnicas de rastreo isotópico para la monitorización del océano ofrecen soluciones para abordar la contaminación por plásticos, uno de los desafíos ambientales más acuciantes a nivel mundial y una amenaza directa para el desarrollo sostenible. La iniciativa TECnología NUClear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics), puesta en marcha en 2021, se basa en las actividades del Organismo encaminadas a abordar la cuestión de la contaminación por plásticos a través del reciclaje, a partir de tecnologías de la radiación, y de la monitorización marina, por medio de técnicas de rastreo isotópico.

17. La aplicación innovadora de haces de rayos gamma y de electrones puede contribuir a la clasificación eficaz de los residuos plásticos en los flujos de reciclaje. Las técnicas nucleares e isotópicas, junto con la circulación oceánica y la modelización de la dispersión, contribuyen a rastrear las fuentes de los plásticos y su destino en el océano, lo que permite a los científicos reconstruir las tendencias históricas de la contaminación del mar por plásticos y comprender mejor el envejecimiento de los microplásticos tras la sedimentación.

18. El uso indebido y excesivo de sustancias antimicrobianas, como antibióticos, antivíricos, fungicidas y antiparasitarios, que se utilizan para prevenir y tratar infecciones que afectan a los seres humanos, animales y plantas, constituye una amenaza para la salud pública mundial y actualmente se

cobra 700 000 muertes al año. El análisis de isótopos estables por compuesto y las tecnologías de sondeo son potentes herramientas para evaluar sustancias antimicrobianas. Se espera que la integración de esas técnicas moleculares isotópicas y avanzadas ayude a conocer mejor el destino y la dinámica de los antibióticos en el estiércol aplicado y sus repercusiones sobre la resistencia a los antibióticos en el medio ambiente.

19. Existe un creciente interés por comprender el efecto del entorno espacial en la producción de mutaciones en los genomas de las plantas y en la modificación de su fisiología, lo cual mejora la capacidad de estas para soportar condiciones de crecimiento adversas en la Tierra, como las que ocasiona el cambio climático. Se prevén rápidos avances en esta esfera dado el continuo interés por explorar la biología de las plantas en el espacio, tanto para alimentar a los astronautas como para utilizar las valiosas mutaciones derivadas de la exposición al espacio para obtener variedades de cultivos resilientes.

20. En la esfera del manejo del cáncer, la teranóstica basada en isótopos se refiere a la combinación de diagnóstico y terapia y permite a los profesionales médicos centrarse en las necesidades concretas de cada paciente. En comparación con los tratamientos de radiación convencionales, el enfoque teranóstico permite lograr una mayor especificidad al dirigirse al tumor con balas radiactivas al tiempo que se preservan los tejidos sanos circundantes, lo que aumenta tanto la eficacia como la inocuidad del tratamiento. En la actualidad, las aplicaciones más destacadas se orientan hacia tumores neuroendocrinos, linfomas y cánceres de próstata, mama, pulmón y tiroides. Cada vez es mayor la necesidad de ampliar la cooperación internacional y la normalización por lo que respecta a la capacitación de expertos médicos y científicos y la creación de infraestructura médica especializada.

21. Las enfermedades relacionadas con la obesidad han alcanzado proporciones epidémicas en todo el mundo, y al menos 2,8 millones de personas mueren cada año como consecuencia del sobrepeso o la obesidad. Se estima que para 2025 las enfermedades relacionadas con la obesidad acarrearán un costo de 1,2 billones de dólares de los Estados Unidos. Los datos sobre el gasto calórico arrojados por la técnica de isótopos estables del agua doblemente marcada son cruciales y aportarán a los encargados de formular políticas las pruebas necesarias para diseñar políticas nutricionales y sanitarias más eficaces que permitan combatir la creciente epidemia de obesidad en todo el mundo. Se precisan, sin embargo, más datos de los países de ingresos medianos y bajos para reforzar la representación mundial en los estudios y permitir que los encargados de formular políticas dispongan de las pruebas necesarias para priorizar las medidas esenciales en materia de nutrición y hacer frente a la epidemia de obesidad.

22. Los radioisótopos y los radiofármacos, que se utilizan tanto con fines de diagnóstico como de tratamiento en el caso del cáncer y de otras enfermedades crónicas, salvan vidas. Garantizar un suministro constante de los principales radioisótopos es fundamental. Dos nuevas vías de producción a partir de aceleradores lineales y de centrales nucleares ofrecen nuevas perspectivas para reforzar y potenciar la cadena de suministro global del radioisótopo de uso médico más utilizado del mundo: el molibdeno 99. La producción de ese radioisótopo mediante haces de electrones de alta energía ya se ha comercializado.

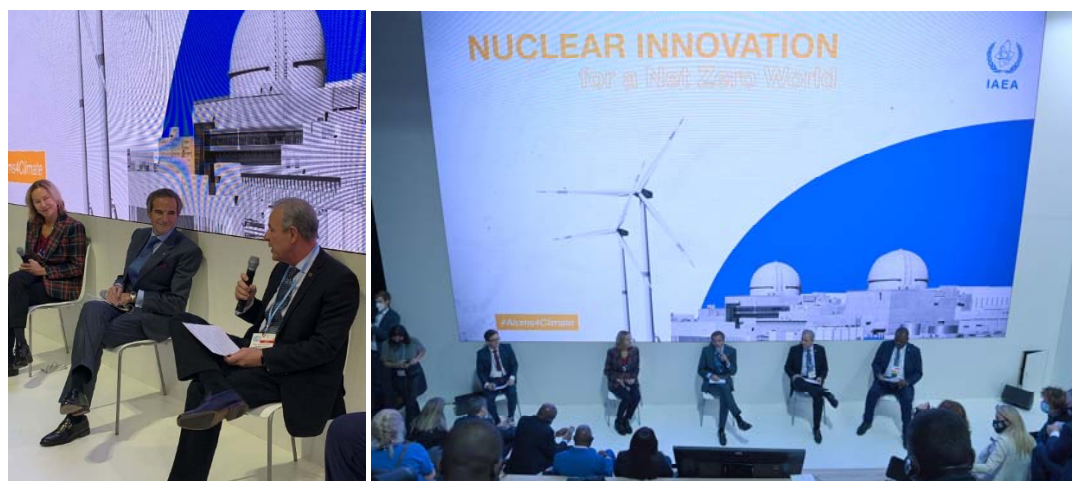
23. La producción de radioisótopos en reactores nucleares se basa en reacciones de captura neutrónica en un material utilizado como blanco. Los reactores de investigación suelen utilizarse para producir radioisótopos destinados a aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear. La manera habitual de producir radioisótopos como el cobalto 60, utilizado en la industria y la braquiterapia, es irradiando blancos en centrales nucleares. En 2021, un reactor comercial de tipo CANDU recibió la autorización del regulador para producir molibdeno 99. Se está estudiando la producción de otros importantes radioisótopos de uso médico de período corto, como el lutecio 177 y el holmio 166. Esto puede abrir nuevos horizontes y llevar a los diseñadores a considerar la posibilidad de crear reactores de potencia capaces de producir radioisótopos.

## A. Energía nucleoelectrica

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

#### Situación

1. Por primera vez desde que hace diez años tuvo lugar el accidente de Fukushima Daiichi, el Organismo ha revisado al alza sus proyecciones relativas al posible aumento de la capacidad nucleoelectrica para la generación de electricidad en los próximos decenios. El cambio en el pronóstico anual del Organismo sobre esta fuente de energía baja en emisiones de carbono no indica todavía una nueva tendencia, pero se produce en un momento en que el mundo se ha propuesto abandonar los combustibles fósiles para combatir el cambio climático. Muchos países están estudiando la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica para impulsar una producción de energía fiable y limpia. Durante el 26º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP26), celebrada en Glasgow (Reino Unido) en noviembre de 2021, tuvieron lugar debates positivos y de alto nivel sobre el uso de la energía nucleoelectrica, lo que supone una novedad en los muchos años que lleva celebrándose esta conferencia (figura A-1).



*Fig. A-1: Diálogo de alto nivel sobre energía nuclear en la CP26 entre el Director General, Rafael Mariano Grossi, el Ministro de Brasil, Sr. Albuquerque, el Ministro de Ghana, Sr. Prempeh, y la Secretaria Ejecutiva de la CEPE, Sra. Algayerova.*

2. Con respecto a la capacidad mundial instalada en 2020, a saber, 392 GW(e), lo que corresponde a un 10,2 % de toda la electricidad generada, la estimación baja prevé que la capacidad nucleoelectrica mundial siga siendo prácticamente la misma en 2050, es decir, 394 GW(e), y que el porcentaje con respecto a la electricidad generada a escala mundial caiga hasta el 6,3 %. La estimación alta, por su parte, prevé que la capacidad instalada aumente en más de un 100 % hasta alcanzar los 792 GW, con el correspondiente incremento en el porcentaje con respecto al total de la electricidad generada, hasta llegar al 12,3 % (figura A-2).



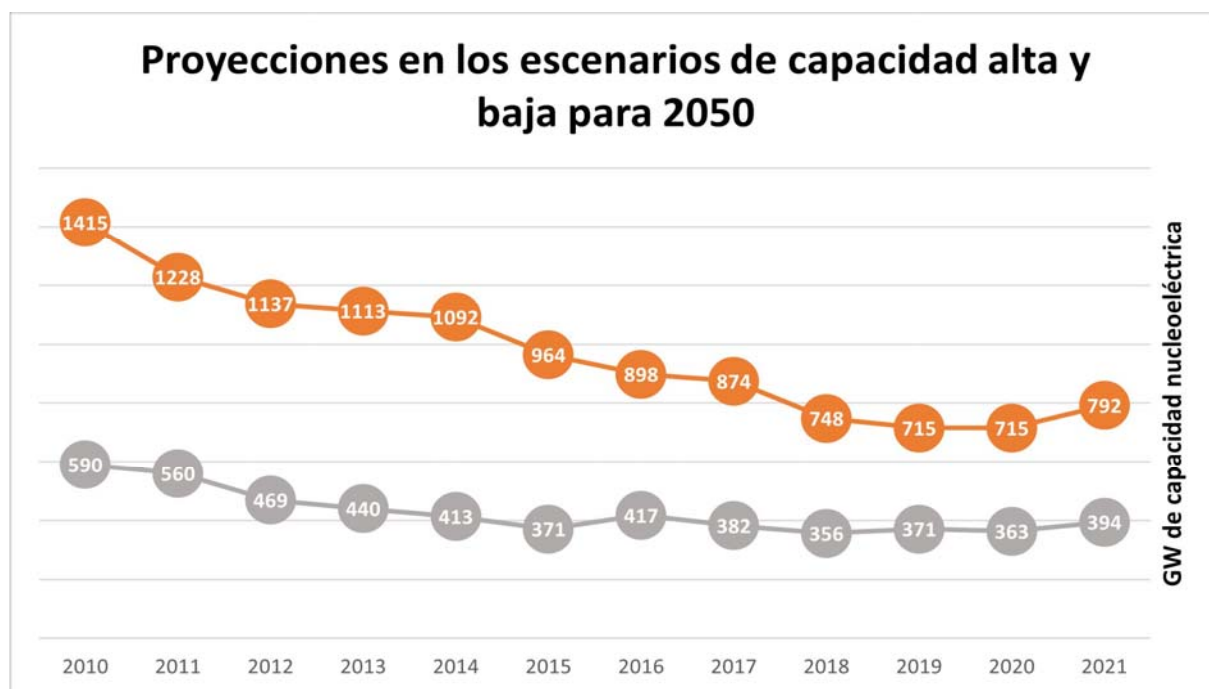


Fig. A-2: Evolución de las proyecciones en los escenarios de capacidad nucleoelectrica alta y baja para 2050 a partir de los datos presentados en los volúmenes de la publicación RDS-1 aparecidos entre 2010 y 2021.

3. Para lograr el aumento previsto en la proyección alta, será necesario recurrir de manera amplia a la explotación a largo plazo del parque actual de reactores nucleares de potencia (por lo general, superando los 40 años de funcionamiento) y realizar un importante esfuerzo para construir 550 GW(e) de nueva capacidad a lo largo de tres decenios. Para ello, las tasas de conexión de los nuevos reactores deben duplicarse como mínimo en los próximos decenios, y también habrá que acelerar la demostración y el despliegue de tecnologías de reactores innovadores.

#### Tendencias

4. El interés por las tecnologías de reactores innovadores es considerable y va en aumento, en particular en lo que respecta a los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR). Aun así, se prevé que, en los próximos tres decenios, el grueso de la capacidad añadida provenga de reactores avanzados refrigerados por agua de grandes dimensiones, que permitirán producir energía con bajas emisiones de carbono para combatir el cambio climático. El sector nuclear seguirá enfrentándose a una serie de retos, como la reducción de los costos y una mayor normalización que mejore la competitividad.

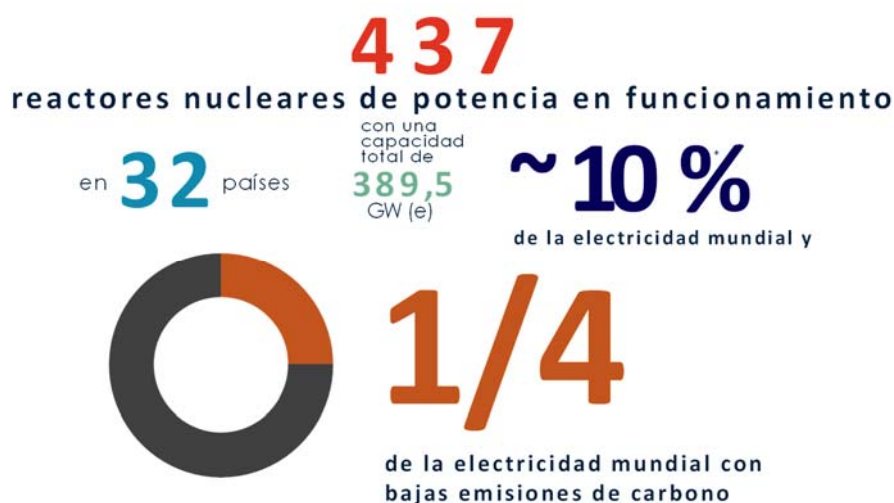
5. Se requerirá un fuerte apoyo en materia de políticas, que reconozca la contribución de la energía nucleoelectrica al establecimiento de unos sistemas de suministro de electricidad resilientes, fiables y con bajas emisiones de carbono, incluido el acceso a financiación en condiciones análogas a otras fuentes de energía con bajas emisiones de carbono. El fomento de oportunidades para que la energía nuclear contribuya a la descarbonización de otros sectores energéticos, por ejemplo mediante la producción de hidrógeno limpio, también podría convertir a la energía nucleoelectrica en una opción más atractiva a ojos de los inversionistas.

## A.2. Centrales nucleares en funcionamiento

### Situación

6. Al final de 2021, la capacidad total de producción de energía nucleoelectrica del mundo ascendía a 389,5 GW(e), generados por 437 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 32 países (véase el cuadro A-1). Los países siguieron demostrando su capacidad de adaptación a la pandemia de

COVID-19 adoptando medidas eficaces para garantizar un funcionamiento seguro y fiable, reduciendo al mínimo al mismo tiempo los riesgos para el personal, lo que pone de manifiesto la existencia de una sólida cultura institucional. En 2021, el Organismo, por conducto de la Red sobre la Experiencia Operacional de las Centrales Nucleares en relación con la COVID-19, siguió compartiendo información sobre las medidas adoptadas para mitigar los efectos de la pandemia y sus repercusiones en el funcionamiento de las centrales nucleares. Ninguno de los 32 países con centrales nucleares en funcionamiento notificó sucesos operacionales debidos a la pandemia con consecuencias en el funcionamiento seguro y fiable de dichas instalaciones.



7. En cuanto fuente de energía limpia, fiable, sostenible y moderna, la energía nucleoelectrica realiza una importante contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, al tiempo que da respuesta a las crecientes demandas de energía a escala mundial y promueve el desarrollo sostenible y la recuperación tras la pandemia de COVID-19. Se conectaron a la red más de 5,2 GW(e) de capacidad nuclear nueva procedentes de seis reactores nuevos. Entre ellos, cuatro nuevos reactores de agua a presión (PWR) (los reactores Tianwan 6 (1000 MW(e) y Hongyanhe 5 (1061 MW(e)), en China, el reactor KANUPP 2 (1017 MW(e)), en el Pakistán, y el reactor Barakah 2 (1310 MW(e)), en los Emiratos Árabes Unidos, un reactor de agua pesada a presión (PHWR) (el reactor Kakrapar 3 (630 MW(e))), en la India, así como un reactor de alta temperatura refrigerado por gas (HTGR) (Shidao Bay 1 (200 MW(e))) en China (figura A-3).

## Capacidad nuclear nueva conectada en MW(e)

Se conectaron a la red 5,2 GW(e) de capacidad nuclear nueva procedentes de cuatro nuevos reactores de agua a presión, un reactor de agua pesada a presión y un reactor de alta temperatura refrigerado por gas

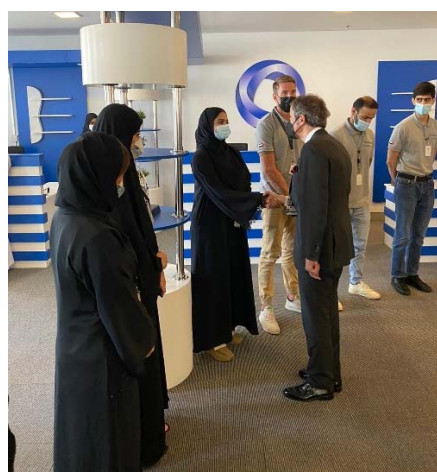
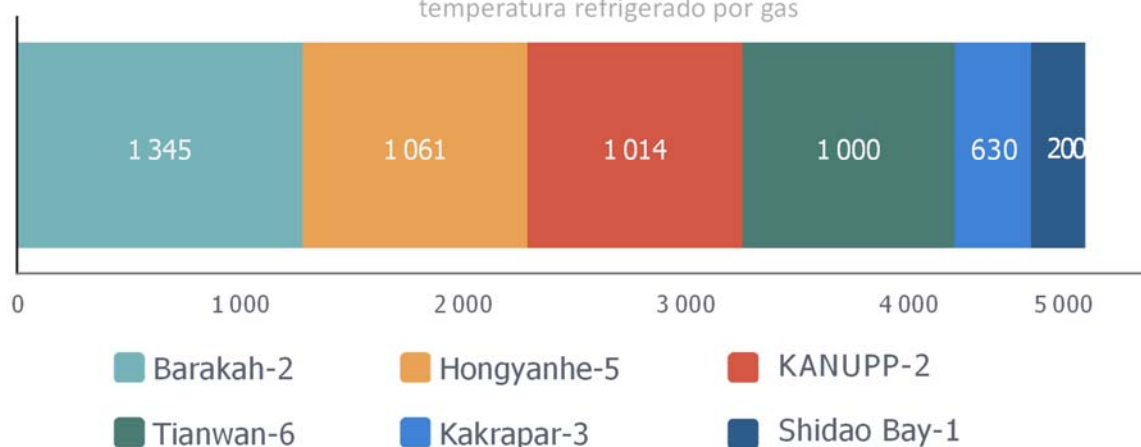


Fig. A-3: En diciembre de 2021, el Director General, Rafael Mariano Grossi, visitó la central nuclear de Barakah en los Emiratos Árabes Unidos y se reunió con jóvenes profesionales del sector nuclear.

8. Aumentó el número de reactores nucleares de potencia con programas de explotación a largo plazo y de gestión del envejecimiento en activo en todo el mundo, especialmente en América del Norte y Europa. La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC) aprobó una solicitud presentada por Dominion Energy para prorrogar por un período de 20 años las licencias de explotación de los reactores Surry 1 y Surry 2, en el sudeste de Virginia. De esa manera, la vida útil de esos dos reactores de potencia se ampliará hasta los 80 años, lo que les permitirá seguir en funcionamiento hasta 2052 y 2053, respectivamente. Asimismo, la Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) de Francia anunció que había terminado de examinar el plan de Électricité de France (EDF) para prorrogar diez años la vida útil de 32 reactores del parque de centrales nucleares de 900 MW(e). La ASN concluyó que las medidas previstas por EDF, sumadas a las prescritas por la ASN, abrían la puerta a seguir explotando esos reactores durante diez años más una vez se hubieran sometido a un cuarto examen periódico de la seguridad. Los estudios actualizados sobre el diseño y la sustitución de equipo que eran necesarios para prorrogar la explotación de los reactores Tricastin 1 y Bugey 2 ya han concluido, lo que permitirá que los reactores funcionen hasta 2031.

9. En 2021 se retiraron permanentemente de la producción 8,7 GW(e) de capacidad nuclear (diez reactores). La mitad de esa capacidad perdida se debe a la parada de tres reactores en Alemania:

Brokdorf (PWR, 1410 MW(e)), Grohnde (PWR, 1360 MW(e)) y Gundremmingen-C (BWR, 1288 MW(e)). En el Reino Unido se retiraron tres reactores refrigerados por gas —Dungeness B-1 (545 MW(e)), Dungeness B-2 (545 MW(e)) y Hunterston B-1 (490 MW(e))—. Los otros tres reactores que entraron en régimen de parada son KANUPP-1 (PHWR, 90 MW(e)), en el Pakistán, Kursk 1 (reactor refrigerado por agua ligera y moderado por grafito, 925 MW(e)) en la Federación de Rusia, e Indian Point 3 (PWR, 1030 MW(e)), en los Estados Unidos de América. También entró en régimen de parada el reactor Kuosheng 1 (BWR, 985 MW(e)) en Taiwán (China).

### Tendencias

10. En general, la capacidad nucleoelectrónica ha aumentado gradualmente en el último decenio, con un aumento de capacidad de unos 20,7 GW(e) como consecuencia de la conexión a la red de nuevas unidades y del aumento de capacidad de los reactores existentes. (Figura A-4)



*Fig. A-4. Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA, visita la Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto en el Brasil y asiste a la construcción del reactor Angra III.*

11. La explotación a largo plazo es esencial, no solo para la transición a unos sistemas de generación de electricidad con bajas emisiones de carbono y para cumplir los objetivos de alcanzar unas emisiones netas cero de carbono, sino también a fin de disponer de tiempo para desarrollar nueva capacidad de generación con bajas emisiones, por ejemplo, nuevas centrales nucleares. Además, las centrales nucleares existentes son la fuente más económica de electricidad con bajas emisiones de carbono tecnológica y físicamente segura. Sin embargo, algunos reactores fueron puestos en régimen de parada en el último decenio, y es probable que otros se clausuren en un futuro próximo por motivos económicos, pese a que se haya concedido a los explotadores la licencia para que las instalaciones sigan en funcionamiento. Además, las cadenas de suministro existentes han afrontado dificultades que podrían repercutir en las operaciones en curso, los proyectos y las paradas programadas. Sin embargo, en los países en fase de incorporación al ámbito nuclear están apareciendo nuevas cadenas de suministro, lo que podría significar la entrada de nuevos actores en el sector.



### A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansion

#### Situación

12. De los 50 Estados Miembros que han mostrado interés por implantar la energía nucleoelectrica, 24 están en la etapa previa a la decisión e inmersos en actividades de planificación. Los 26 países restantes ya están trabajando a ese respecto y pueden dividirse en dos grupos distintos:

- 16 se encuentran en la fase de adopción de decisiones: se trata de países que están considerando la posibilidad de utilizar la energía nucleoelectrica, incluidos los que están realizando estudios preliminares de viabilidad o preparando activamente la infraestructura pese a que todavía no han adoptado ninguna decisión sobre esta cuestión (Argelia, El Salvador, Estonia, Etiopía, Filipinas, Indonesia, Kazajstán, Marruecos, Níger, Senegal, Sri Lanka, Sudán, Tailandia, Túnez, Uganda y Zambia).
- 10 se encuentran en la fase posterior a la decisión: se trata de países que ya han tomado una decisión sobre esta cuestión y están construyendo la infraestructura, o que han firmado un contrato y comenzarán las obras en un futuro próximo (Arabia Saudita, Bangladesh, Egipto, Ghana, Jordania, Kenya, Nigeria, Polonia, Türkiye y Uzbekistán).



13. Bangladesh está construyendo su primera central nuclear y se prevé que las dos unidades empiecen a funcionar con fines comerciales en 2024 y 2025, respectivamente. Las obras de las cuatro unidades de la central nuclear de Akkuyu, en Türkiye, prosiguieron en 2021. Según los planes, la puesta en servicio de las cuatro unidades tendrá lugar entre 2023 y 2026. En Egipto, la Autoridad de Centrales Nucleares (NPPA) solicitó una licencia de construcción para las unidades 1 y 2 de El Dabaa en julio de 2021. Continúan los trabajos de preparación del emplazamiento para las obras de construcción. Se está llevando a cabo una reestructuración de ambas organizaciones clave (la NPPA y la Autoridad Reguladora



Nuclear y Radiológica de Egipto) sobre la base de las necesidades del programa. En Polonia, el Tesoro Público adquirió en marzo de 2021 la totalidad de la empresa PGE EJ 1, que pasó a llamarse PEJ. Esta empresa actuará como inversora de los PWR previstos, que en total sumarán de 6000 a 9000 MW(e) de capacidad nucleoelectrónica instalada para 2042. Está previsto que las obras de construcción de las dos primeras centrales nucleares empiecen en 2026 y 2032, y que la primera unidad se ponga en servicio en 2033. En la Argentina la construcción de CAREM, ubicado en el emplazamiento adyacente a la central nuclear Atucha 1, se encuentra en una fase avanzada, con miras a producir 32 MW(e) como demostración del prototipo.

14. En la Arabia Saudita, se están elaborando actualmente las especificaciones de la convocatoria a licitar para la adquisición de las dos primeras unidades de central nuclear de 1000-1600 MW(e). Jordania ha decidido seguir dos vías paralelas en cuanto al desarrollo de un programa nucleoelectrónico, siendo la prioridad principal una central nuclear grande (de 1000 MW(e), basada en un enfoque articulado alrededor de la construcción, la titularidad, la explotación y la transferencia) y varios SMR. Se han redactado los documentos de la convocatoria a licitar para el proyecto de SMR y se espera que estén listos y se publiquen para principios de 2022. Ghana siguió trabajando en el desarrollo de su infraestructura nacional para un programa nucleoelectrónico, incluido un mayor desarrollo de las capacidades de las instituciones clave. El Ministerio de Energía publicó una expresión de interés de posibles proveedores con miras a desarrollar una capacidad de unos 1000 MW(e). Está previsto que las obras de construcción de la primera central nuclear se inicien en 2023 y que la instalación entre en servicio para 2029. Kenya ha anunciado que estudiará la posibilidad de construir tanto un reactor de investigación como una central nuclear de grandes dimensiones, y que examinará además la cuestión de los SMR. Tras los retrasos debidos a los cambios organizativos en las principales instituciones y a la pandemia de COVID-19, Nigeria ha reanudado las actividades relacionadas con su programa nucleoelectrónico, actualizando, entre otras cosas, su estudio preliminar de viabilidad y su estudio de viabilidad para volver a evaluar la viabilidad económica del proyecto de central nuclear. Para muchos de estos países, la incorporación de la energía nucleoelectrónica a la canasta de energía contribuye de manera importante a sus objetivos de mitigación del cambio climático. Varios de ellos (Egipto, Jordania y Türkiye) han incluido la energía nucleoelectrónica en las contribuciones determinadas a nivel nacional que presentaron en la CMNUCC en virtud del Acuerdo de París.

15. En 2021, se acogieron tres misiones del Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) del Organismo: en Kenya (Fase 1, seguimiento), Uganda (Fase 1) y Uzbekistán (Fase 2). La misión prevista en Sri Lanka (Fase 1) se pospuso debido a la COVID-19 (figura A-5). El Organismo también recibió solicitudes para realizar una misión INIR de Fase 1 en Zambia y una misión INIR de Fase 3 en Bangladesh, que se prevé llevar a cabo en 2022 y 2023, respectivamente.



Fig. A-5: El OIEA examina el desarrollo de la infraestructura nucleoelectrica de Uganda.

16. Además, 15 Estados Miembros cuentan con planes de trabajo integrados en vigor. Debido a las repercusiones de la COVID-19, estos planes se examinaron en su totalidad o en el marco de exámenes de mitad de período en reuniones virtuales con los grupos básicos.

## Misiones de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear



### Tendencias

17. 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, en comparación con los 32 países actuales. Este incremento considerable obliga a seguir intensificando el grado de preparación en términos de infraestructura de los países a los que el Organismo presta apoyo para garantizar un despliegue responsable.

De aquí a 2035,



el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría aumentar en un

**+30 %**\*

con la

incorporación de

**10-12** nuevos países

con centrales nucleares en funcionamiento.

18. Un avance tecnológico importante que llama 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. En consecuencia, varios países en fase de incorporación al ámbito nuclear han incluido los SMR en sus consideraciones tecnológicas o siguen supervisando los avances al respecto; entre estos figuran países en fase de incorporación como la Arabia Saudita, Estonia, Filipinas, Ghana, Indonesia, Jordania, Kenya, Polonia, el Sudán y Zambia, y países en fase de ampliación como Bulgaria, la República Checa, Rumania 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.

19. Conviene insistir en que, tanto si el programa se basa en centrales nucleares de grandes dimensiones como en SMR, la infraestructura nucleoelectrica a escala nacional necesita la misma atención estricta y constante a los requisitos de seguridad tecnológica nuclear, seguridad física nuclear y salvaguardias.

20. Coincidiendo con los progresos realizados por los diez Estados Miembros que han empezado a desarrollar sus programas nucleoelectricos basados en centrales nucleares evolutivas, que muestran que sigue habiendo interés en la tecnología de las centrales nucleares a gran escala, los Estados Miembros han notificado que pretenden utilizar el diseño de referencia para la explotación y sacar provecho de la experiencia adquirida por los reguladores y los explotadores del país de origen.

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

##### **Situación**

21. Los reactores nucleares evolutivos, es decir, los diseños que solo implican modificaciones o mejoras moderadas en el parque actual de centrales nucleares, son ya una realidad muy asentada en muchas partes del mundo. Hay reactores avanzados refrigerados por agua en funcionamiento en Belarús, China, los Emiratos Árabes Unidos, la Federación de Rusia y el Japón. Otros países, la Argentina, los Estados Unidos de América, Finlandia, Francia y el Reino Unido, cuentan con reactores avanzados refrigerados por agua de distintas potencias en fases avanzadas de construcción y, en algunos casos, se está procediendo a su puesta en servicio. Dos reactores rápidos refrigerados por sodio de tamaño industrial están en funcionamiento en la Federación de Rusia, donde también se ha empezado a construir el novedoso reactor rápido refrigerado por plomo. También hay reactores rápidos en funcionamiento o en construcción en China y la India. En diciembre de 2021 se conectó a la red en China el primer reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas que utiliza tecnología de lecho de bolas.

22. Paralelamente, los Estados Miembros muestran un creciente interés por el rápido desarrollo y el despliegue temprano de reactores innovadores, es decir, diseños avanzados que incorporan cambios

conceptuales en los enfoques de diseño o en la configuración del sistema con respecto a la práctica actual. Se están desarrollando conceptos innovadores en todas las familias de reactores principales, esto es, en los reactores refrigerados por agua, los reactores de alta y muy alta temperatura refrigerados por gas, los reactores refrigerados por sodio, plomo y gas con espectros de neutrones rápidos, los reactores de sales fundidas y, más recientemente, los microrreactores. En el caso de algunos conceptos a corto plazo, el desarrollo está casi terminado mientras que, en el de otros diseños más innovadores, queda mucho por hacer, entre otras cosas, actividades de investigación y desarrollo (I+D), pruebas de viabilidad y la formulación integral de la justificación de la seguridad. Sin embargo, varios diseñadores y proveedores de todo el mundo están desarrollando distintos prototipos y reactores innovadores de demostración.

23. En el último decenio, la industria nuclear y un número cada vez mayor de Estados Miembros han centrado su interés en una categoría especial de reactores avanzados, los reactores modulares pequeños, para su despliegue a corto plazo. Muchos reactores modulares pequeños están pensados para mercados de energía o electricidad especializados en los que los reactores avanzados de grandes dimensiones no serían una opción viable. Los reactores modulares pequeños deberían satisfacer la necesidad de una generación flexible de energía eléctrica para una amplia gama de usuarios y aplicaciones sustituyendo las centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles que vayan envejeciendo, y para zonas remotas y no conectadas a la red, y proporcionando cogeneración para aplicaciones eléctricas y no eléctricas, lo que propiciará la existencia de sistemas híbridos de energía nuclear y renovable.

### **Tendencias**

24. Con la aparición de capacidades informáticas e instrumentos de análisis de datos potentes, la industria nuclear está incorporando la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y las técnicas del aprendizaje profundo a una amplia gama de actividades visionarias que podrían transformar la manera en que se diseñan, licencian y funcionan los sistemas nucleares. La inteligencia artificial podría llegar a mejorar la integración de los cálculos y los datos experimentales recopilados en experimentos a pequeña escala o procedentes de sensores durante su funcionamiento. Al optimizarse, esa integración permite a los científicos computacionales desarrollar modelos físicos de una exactitud sin precedentes y ayuda a los científicos experimentales a reducir al mínimo el costo y el número de experimentos para validar estos sistemas novedosos. Asimismo permite que los operadores del sistema supervisen los estados de este que no pueden controlarse directamente mediante instrumentos. Las metodologías y los instrumentos de inteligencia artificial pueden utilizarse para realizar análisis predictivos basados en la física que permitan optimizar el diseño, la fabricación y la construcción, velar por la eficacia operacional, mejorar las iteraciones del diseño de nuevos reactores, detectar fallos basados en modelos y desarrollar sistemas de control avanzados. La inteligencia artificial también puede aportar otros beneficios a la industria nuclear en términos de fiabilidad, seguridad y eficiencia general.

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

##### **Situación**

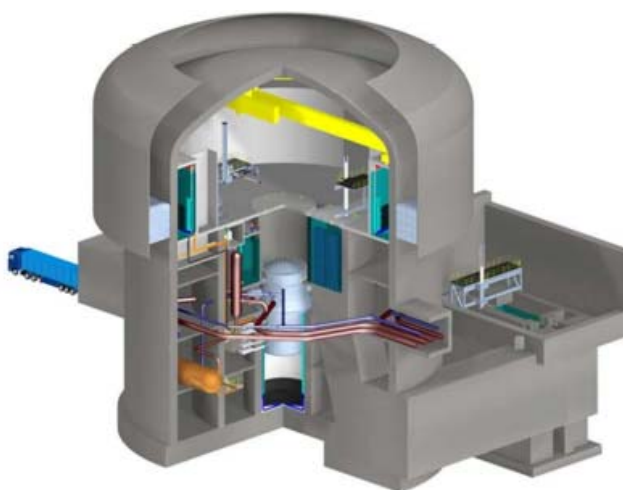
25. Los reactores refrigerados por agua (WCR) han desempeñado un importante papel en la industria nuclear comercial desde sus inicios y actualmente representan más del 95 % de todos los reactores de potencia civiles en funcionamiento en el mundo. Al final de 2021, 48 de los 51 reactores nucleares en construcción eran modelos refrigerados por agua ligera o pesada.

26. Entre los principales progresos realizados en 2021 en materia de WCR avanzados figuran el inicio de la construcción de un reactor HPR-1000 (Changjiang 3 en China), de reactores WWER-1200 (V-491) (Tianwan 7 y Xudabao 3 en China) y de un reactor WWER (V-509) (Akkuyu 3 en Türkiye), así como nuevas conexiones a la red: un reactor APR-1400 (Barakah 2 en los Emiratos Árabes Unidos), un reactor

ACPR-1000 (Hongyanhe 5 en China), un reactor CNP-1000 (Tianwan 6 en China), un reactor ACP-1000 (KANUPP 2 en el Pakistán) y un reactor PHWR-700 (Kakrapar 3 en la India).

27. En varios países también se están redoblando los esfuerzos relacionados con el examen, el estudio y la implementación de versiones avanzadas de WCR existentes, con el despliegue gradual de ciclos del combustible avanzados y más eficientes.

28. Cuatro países (Canadá, China, Federación de Rusia y Japón) y la Unión Europea participan en actividades de I+D conjuntas respecto de conceptos de diseño para un reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR). El principal propósito de los SCWR es generar electricidad de forma eficiente, económica y segura. La mayoría de las centrales de SCWR se conciben para generar una potencia superior a los 1000 MW(e) a unas presiones de funcionamiento del orden de 25 MPa y temperaturas de salida del reactor que van de 500 °C a 625 °C. Por consiguiente, los SCWR podrían producir electricidad con una eficiencia térmica de entre el 43 % y el 48 %, un porcentaje notablemente superior al del parque actual de sistemas de reactores nucleares. La alta temperatura de salida del núcleo de los SCWR facilita la cogeneración, que incluye la producción de hidrógeno, la calefacción y la producción de vapor. La mayoría de los conceptos de SCWR se desarrollan para una elevada generación de carga base, de más de 1000 MW(e), que se considera excesiva para pequeñas comunidades remotas, actividades de extracción a pequeña escala y la producción de petróleo. Dada su configuración modular, los conceptos de SCWR pueden reducirse para satisfacer las necesidades de despliegue local. También se ha iniciado el desarrollo de conceptos de SCWR pequeños y muy pequeños; China está desarrollando un concepto de 150 MW(e) para una central de demostración. Se han ultimado los diseños conceptuales del SCWR canadiense, un concepto de reactor de tubos de presión moderado por agua pesada, y el CSR1000 chino (figura A-6).



*Fig. A-6. Diseño del SCWR canadiense: sección transversal del edificio del reactor (Imagen: Schulenberg y Leung, Laboratorios Nucleares Canadienses)*

29. En Europa, el concepto del reactor de agua ligera de alto rendimiento se ocupa de la viabilidad económica de un LWR de gran eficiencia que funcione bajo condiciones de agua supercrítica con una eficiencia prevista de ~44 % y una temperatura de salida de vapor prevista de 500 °C sin superar los límites del plaquedo actuales. El diseño conceptual innovador de los reactores de potencia refrigerados y moderados por agua (WWER) de la Federación de Rusia con refrigerante a presión supercrítica también incluye la posibilidad de un núcleo de espectro rápido.

### **Tendencias**

30. La mayoría de los WCR avanzados han incrementado la producción eléctrica, que en las construcciones recientes varía entre 1000 y 1700 MW(e) por unidad, y en la fase de diseño de WCR evolutivos grandes se está trabajando para obtener incrementos aún mayores. Además, hay una



tendencia clara a los emplazamientos con unidades múltiples con uno o múltiples tipos de reactor, lo que pone de relieve las economías de escala en los reactores nucleares comerciales. Unos 30 países que actualmente carecen de centrales nucleares en funcionamiento están considerando la posibilidad de construirlas. En estos países que se están incorporando al ámbito nuclear, se prevé que las primeras unidades sean reactores avanzados refrigerados por agua.

#### **A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares, incluidos reactores de alta temperatura**

##### **Situación**

31. A lo largo de 2021, muchos Estados Miembros han realizado avances tangibles en el desarrollo de la tecnología de los SMR para su despliegue a corto plazo. Se están desarrollando más de 70 diseños de reactores modulares pequeños de las principales líneas tecnológicas para distintas aplicaciones.

32. En la Federación de Rusia, la central nuclear flotante Akademik Lomonosov, con dos módulos de reactor KLT-40S, lleva explotándose comercialmente desde mayo de 2020, tras haberse conectado a la red en diciembre de 2019, y abastece de electricidad y calor con bajas emisiones de carbono al puerto de Pevek. En China, el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por gas (HTR-PM) se conectó a la red el 20 de diciembre de 2021 (figura A-7). Los dos módulos del reactor HTR-PM alcanzaron la criticidad en agosto y noviembre de 2021, respectivamente. El HTR-PM generará 210 MW(e) como central de demostración. En la Argentina, el reactor CAREM-25, un prototipo de PRW integrado (iPWR), está en una etapa avanzada de construcción en el emplazamiento de la central nuclear Néstor Carlos Kirchner, y se está trabajando para que la carga del combustible y la puesta en marcha y en servicio del reactor se lleven a cabo en 2024, a fin de producir 100 MW(t) y 34 MW(e) brutos.



*Fig. A-7. El HTR-PM de China se conectó a la red eléctrica el 20 de diciembre de 2021.  
(Fotografía: Universidad de Tsinghua, Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear  
y de las Nuevas Energías, China)*

33. En julio de 2021, China inició la construcción de un reactor ACP100 de 125 MW(e), también conocido como Linglong One, en Changjiang, en la provincia de Hainan. Este iPWR está concebido como un pequeño reactor de potencia multipropósito. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) concedió la aprobación del diseño estándar para el diseño estándar del reactor NuScale. El NuScale Power Module (NPM) es un iPWR con circulación natural. La construcción del NPM, que

consta de 6 módulos de 77 MW(e) cada uno, se iniciará en los próximos tres años en un emplazamiento cercano al Laboratorio Nacional de Idaho, y está previsto que entre en funcionamiento en 2029.

34. A finales de 2021, al menos 16 Estados Miembros habían establecido programas nacionales activos sobre el diseño y el desarrollo tecnológico de los SMR, la mayoría de los cuales se llevan a cabo con colaboración internacional. En julio de 2021, el Japón reanudó las actividades de su reactor experimental de alta temperatura (HTTR), que genera 30 MW(t) a partir del núcleo del reactor de lecho prismático. Previamente, la Arabia Saudita y la República de Corea habían completado conjuntamente la fase de ingeniería previa al proyecto del reactor modular avanzado integrado (SMART), que dio lugar a un informe preliminar de análisis de la seguridad respecto del iPWR de 110 MW(e). Francia avanza en el desarrollo de NUWARD, un reactor SMR de tipo iPWR de 340 MW(e) (dos reactores de 170 MW(e)) con convección forzada y sistemas de seguridad avanzados, para su posible despliegue en mercados extranjeros a principios de la década de 2030. Del mismo modo, el Reino Unido siguió trabajando en el desarrollo de tecnología para su SMR, un diseño de SMR de 470 MW(e) basado en un PWR de tres bucles, con miras a su despliegue a escala nacional e internacional de aquí a 2030. En la Federación de Rusia se decidió empezar a construir en 2024, en Yakutia, el RITM-200N, un iPWR terrestre que generará 50 MW(e). Se han desplegado varias unidades de reactor RITM-200 en buques rompehielos nucleares. En el Canadá, la hoja de ruta y el plan de acción para los SMR prevén posibles aplicaciones de los SMR para la sustitución con y sin conexión a la red de las centrales de generación eléctrica alimentadas con diésel y combustibles fósiles, también en los sectores petrolífero y minero.

### Tendencias

35. En 2021, también se intensificaron las actividades de desarrollo de un subconjunto de SMR conocidos como microrreactores en varios países, como el Canadá, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón, el Reino Unido y la República Checa. Se cree que los microrreactores, de las principales líneas tecnológicas, podrían ser la solución óptima para proporcionar cogeneración de calor y electricidad en regiones remotas o islas pequeñas, y/o para sustituir los generadores diésel.

36. Nuevos países se sumaron al compromiso de desarrollar reactores instalados en plataformas marinas. La Federación de Rusia ha desarrollado cuatro diseños de SMR para unidades flotantes de potencia y un diseño, llamado SHELF, para una unidad de potencia sumergible submarina (figura A-8). China tiene al menos un diseño, el ACPR100, para suministrar electricidad a las plataformas de petróleo y gas situadas mar adentro. La República de Corea también ha seguido desarrollando BANDI-60, una unidad flotante de potencia basada en un PWR.



*Fig. A-8. La central nuclear Akademik Lomonosov, con dos reactores KLT-40S, se está explotando con fines comerciales desde mayo de 2020 y produce 70 MW(e) en Pevek (Federación de Rusia). (Fotografía: Oficina de Diseño Experimental de Ingeniería Mecánica Afrikantov de Rosatom)*

37. El objetivo común que se busca con el desarrollo de los SMR es demostrar que una potencia y una modularidad menores permitirán rebajar los costos de capital iniciales gracias a los ahorros resultantes de la producción en serie, y que la simplificación del diseño y los breves plazos de construcción permiten elaborar unos planes de financiación razonables. Para ayudar a que los Estados Miembros lleguen a un entendimiento común de sus necesidades y especificidades en cuanto a la tecnología de los SMR, el Organismo ha iniciado un nuevo marco para el desarrollo de requisitos genéricos para los usuarios y criterios para el diseño y la tecnología de los reactores modulares pequeños. La principal ventaja de un documento nacional a ese respecto es que aporta un conjunto de requisitos clave en materia de políticas y cuestiones técnicas y económicas que ayudarán a los países en fase de incorporación al ámbito nuclear a realizar una evaluación de la tecnología de los reactores y, en último término, a elaborar un documento de licitación. Se espera que el despliegue satisfactorio de SMR en el próximo decenio aliente a más países en fase de incorporación al ámbito nuclear a considerar esos reactores y participar en las actividades de I+D pertinentes.

### A.4.3. Reactores rápidos

#### Situación

38. La Federación de Rusia sigue explotando en la central nuclear de Beloyarsk dos reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR) de tamaño industrial, el BN-600 y el BN-800, y está diseñando el BN-1200, un SFR de la Generación IV que se construirá en el mismo emplazamiento. Se está construyendo en Dimitrovgrad el reactor de investigación rápido multipropósito. En junio de 2021, se inició en Seversk el vertido de hormigón para el primer reactor experimental y de demostración refrigerado por plomo, el BREST-OD-300. China siguió construyendo un segundo SFR, el CFR-600, en el condado de Xiapu, en la provincia de Fujian. En la India, se pospuso la primera criticidad y puesta en servicio del prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e) refrigerado por sodio, prevista para 2020. En 2021, TerraPower y GE Hitachi Nuclear Energy anunciaron sus planes de construir en Wyoming (Estados Unidos de América) un reactor híbrido avanzado Natrium dotado de un SFR de 345 MW(e) y un sistema energético de sales fundidas para aumentar la potencia máxima de salida hasta 500 MW(e) (figura A-9).



*Fig. A-9. Bill Gates en TerraPower con una maqueta de un subconjunto refrigerado por sodio  
(Fotografía: Gates Notes)*

#### Tendencias

39. Los reactores rápidos refrigerados por sodio, con su tecnología consolidada y más de 400 años-reactor de funcionamiento, constituyen la mayoría de los sistemas de energía nuclear de neutrones rápidos en funcionamiento y de nueva construcción. Al mismo tiempo, la tecnología de refrigeración por metal líquido pesado está atrayendo cada vez más atención, especialmente en la esfera de los SMR,

donde varios diseños innovadores se basan en reactores refrigerados por plomo o por mezcla eutéctica plomo-bismuto. En sus diseños conceptuales de reactores innovadores, varios países también están considerando como una tecnología prometedora otros refrigerantes, por ejemplo, el helio y las sales fundidas. En general, se cree que los reactores rápidos son un componente clave de la energía nuclear sostenible del futuro, ya que para cualquier desarrollo a gran escala de la energía nucleoelectrica se necesitará emplear todo el potencial de los recursos de uranio natural y/o torio.

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

##### **Situación**

40. En 2021, se utilizaron en total 61 reactores nucleares en funcionamiento para aplicaciones no eléctricas (desalación, calefacción urbana y calefacción industrial) a fin de generar más de 2167 GW·h de equivalente eléctrico del calor cada año. De estos reactores, 48 apoyaron la calefacción urbana, 3 reactores respaldaron el calor industrial, 5 apoyaron tanto la calefacción urbana como el calor industrial y 5 la desalinación.

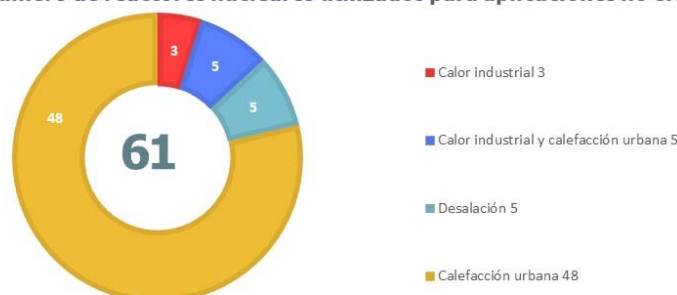
41. El uso de la energía nuclear más allá de la electricidad para otros productos útiles despierta un interés sin precedentes en todo el mundo, principalmente porque ofrece la posibilidad de producir calor o hidrógeno u otros productos sin emitir carbono. La tecnología de calefacción a partir de la energía nuclear tiene una dilatada trayectoria técnica, amplias perspectivas de mercado y un gran potencial de desarrollo. Sumándose al grupo de usuarios de calefacción urbana experimentados, entre los que figuran Bulgaria, Eslovaquia, la Federación de Rusia, Hungría, la República Checa, Rumania, Suiza y Ucrania, China comenzó a suministrar calefacción urbana desde la central nuclear de Haiyang, en la provincia de Shandong, a finales de 2020. La utilización del calor proporcionado por las unidades 1 y 2 de Haiyang (reactores de Generación III de tecnología AP1000) ha permitido sustituir las calderas de carbón, lo que ha supuesto una reducción de las emisiones de dióxido de carbono de 180 000 toneladas anuales. En la central nuclear de Qinshan, en la provincia de Zhejiang, se puso también en marcha un proyecto de demostración de calefacción urbana con el objetivo de disponer, para 2025, de una superficie de 4 millones de m<sup>2</sup> dotados de calefacción nuclear, que abarcará la principal zona urbana del condado de Haiyan y toda la zona de la ciudad de Shupu.

42. Varios países están estudiando la posibilidad de producir hidrógeno a partir de electricidad o del calor generado por reactores nucleares. Según una investigación reciente realizada a partir de un trabajo de modelización a cargo del Organismo, la energía nuclear podría ser el medio más eficaz en relación con el costo para producir hidrógeno limpio si los precios del gas se mantienen muy por encima de los bajos niveles observados en los últimos decenios. Este cambio se produce cuando el costo del gas natural alcanza un precio de entre 10 y 15 dólares por millón de unidades térmicas británicas, sustancialmente inferior al ya observado en el segundo semestre de este año en la Unión Europea, el Reino Unido y partes de Asia.

43. Francia anunció en octubre de 2021 que, para 2030, tiene intención de iniciar la construcción de un reactor modular pequeño y de utilizar otras centrales nucleares para producir hidrógeno limpio mediante electrólisis. La Federación de Rusia ha elegido el emplazamiento de la central nuclear de Kola a fin de realizar una prueba para la producción de hidrógeno limpio mediante electrólisis. También en 2021, los Estados Unidos de América anunciaron fondos por valor de 20 millones de dólares para llevar a cabo actividades de demostración de la tecnología que puede producir energía limpia de hidrógeno a partir de energía nucleoelectrica. Esto apoyará el objetivo de Hydrogen Shot, una iniciativa emprendida este año para lograr un costo de 1 dólar por 1 kg de hidrógeno en una década.

más de  
**2 167** GWh  
de equivalente eléctrico del calor generado en apoyo de la  
cogeneración nuclear

Número de reactores nucleares utilizados para aplicaciones no eléctricas



## Tendencias

44. Las tecnologías emergentes, como los SMR y los microrreactores, se están centrando en sistemas con una menor potencia de salida que pueden ofrecer aplicaciones que van más allá de la red eléctrica, como son el calor con bajas emisiones de carbono para las redes urbanas, el calor industrial, la producción de hidrógeno y la generación flexible de energía eléctrica. Los microrreactores son especialmente idóneos para suministrar energía limpia y competitiva en términos de costos a unos mercados descentralizados y sin conexión a la red. Especial interés revisten los conceptos de reactores avanzados capaces de producir altas temperaturas que podrían ampliar significativamente las posibilidades de usar el calor. Se están desarrollando reactores de alta temperatura (HTR) en varios países, entre ellos, el Japón, que está logrando importantes avances, y China, que ha puesto recientemente en funcionamiento su primera unidad de HTR-PM en la provincia de Shandong.

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

#### Situación

45. El proyecto ITER sigue realizando avances en cuanto al ensamblaje de la maquinaria y la planta, a pesar de una presión sin precedentes debida a la pandemia y a las dificultades en la fabricación de algunos componentes del ITER, que son piezas novedosas. Se han realizado importantes avances en el ensamblaje y la integración de la máquina del ITER, como la instalación de la pieza inferior cilíndrica del criostato de blindaje térmico en el foso del tokamak, la soldadura de las dos primeras secciones del criostato, la instalación de los dos primeros imanes superconductores en el foso del tokamak y la llegada al emplazamiento de dos bobinas de campo toroidal (provenientes de Europa y del Japón), así como del primer módulo del solenoide central (de los Estados Unidos de América), que se ensamblará con seis módulos independientes apilados en una estructura de 18 metros de altura (figura A-10).



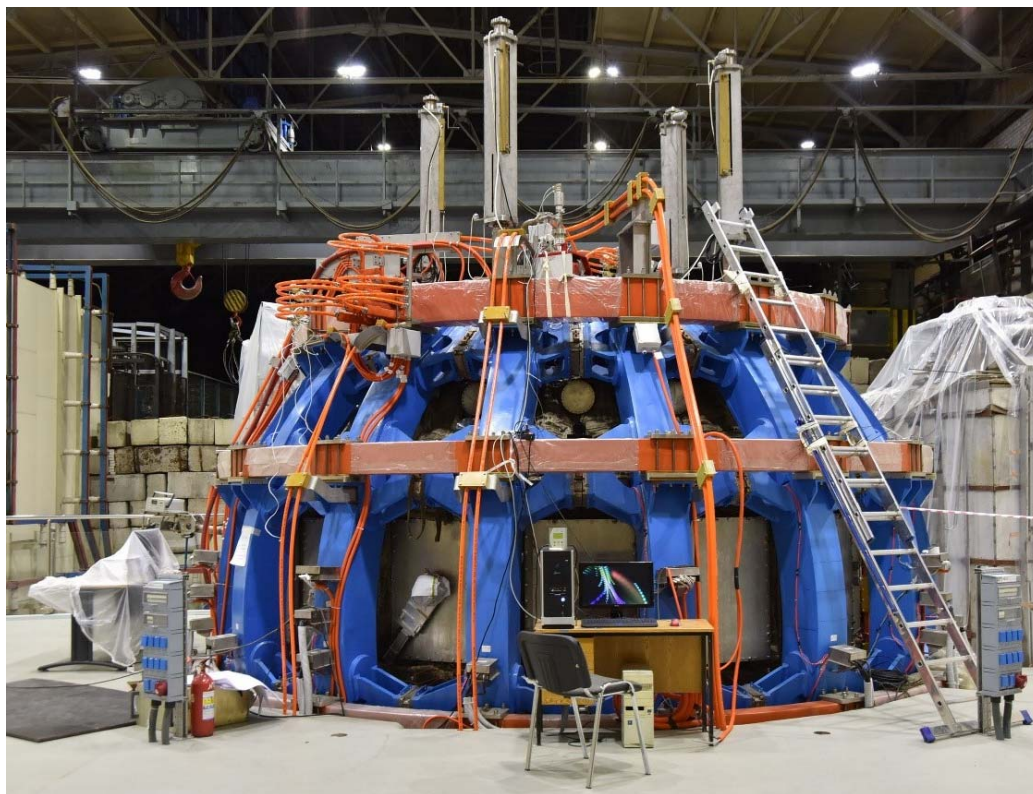


*Fig. A-10. Carga del módulo del solenoide central del ITER, de 110 toneladas, en la bodega de un buque de carga general para su traslado desde los Estados Unidos de América hasta el emplazamiento del ITER en Francia. El imán central, de 1000 toneladas y cinco pisos de altura, inducirá 15 millones de amperios de corriente eléctrica en el plasma del ITER para iniciar cada pulso de plasma y lograr la estabilidad vertical del plasma. Para lograrlo, el solenoide central alcanzará una intensidad de campo magnético de 13 teslas, unas 280 000 veces superior a la del campo magnético de la Tierra. (Fotografía: US ITER)*

46. La 28ª Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión, celebrada virtualmente del 10 al 15 de mayo de 2021, puso de manifiesto la calidad del desarrollo teórico, experimental, tecnológico y de materiales que se está llevando a cabo en todo el mundo, así como los importantes avances que se han logrado en cuanto al rendimiento de las máquinas actualmente operativas, incluidos algunos dispositivos nuevos que han entrado en funcionamiento recientemente, como el JT-60SA en el Japón, el HL-2M en China y el MAST-U en el Reino Unido.

47. Los resultados de los experimentos realizados en el tokamak europeo JET, en preparación para la campaña del tritio y el deuterio-tritio, han proporcionado al ITER información importante para preparar su sistema para la mitigación de interrupciones, así como resultados clave respecto de la tecnología nuclear y los componentes expuestos al plasma. Los resultados del análisis de los experimentos realizados en el estelarator optimizado Wendelstein 7-X en Alemania han confirmado que las pérdidas de energía del plasma son reducidas, lo que permite confiar en que las desventajas de diseños anteriores del estelarator pueden superarse y en que los dispositivos de tipo estelarator podrían ser también adecuados para las centrales eléctricas. Los resultados del nuevo experimento MAST-U de la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido (UKAEA) en el Centro de Energía de Fusión de Culham han demostrado la eficacia de un innovador sistema extractor de calor diseñado para hacer que las centrales eléctricas de fusión compactas sean comercialmente viables. El nuevo sistema, conocido como “desviador Super-X”, permitiría que los componentes de los futuros tokamaks comerciales fueran mucho más duraderos, aumentando así la disponibilidad de la central y mejorando su viabilidad económica. Durante los próximos dos decenios la instalación Divertor Tokamak Test (DTT) que se está construyendo en el emplazamiento de la Agencia Nacional Italiana de Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sostenible, en Frascati, también pondrá a prueba diferentes formas de divisores y los comparará en un plasma con flujo de potencia de alta densidad, lo más parecido posible a un verdadero plasma en condiciones de quemado.

48. El Instituto Kurchatov, en la Federación de Rusia, celebró la entrada en funcionamiento del tokamak T-15MD mejorado (figura A-11). El programa de investigación sobre el tokamak T-15MD tendrá por objeto resolver los problemas más acuciantes del ITER. Los experimentos realizados en la Instalación Nacional de Ignición del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (Estados Unidos de América) han supuesto un importante paso para demostrar que es posible producir energía de fusión, logrando un rendimiento energético superior a 1,3 megajulios.



*Fig. A-11. El tokamak T-15MD está refrigerado por agua y es capaz de crear un campo magnético toroidal en el eje del plasma de 2 T. Asimismo, estará equipado con otros potentes sistemas de calentamiento de plasma con una potencia total de entrada en el plasma de hasta 20 MW, y una moderna infraestructura de ingeniería. La corriente en el plasma debería alcanzar 2,0 MA durante 10 s. El tokamak T-15MD se construyó a lo largo de diez años y su programa experimental contribuirá al funcionamiento del ITER y de las futuras centrales eléctricas de fusión.  
(Fotografía: Instituto Kurchatov)*

49. Uno de los elementos clave para el desarrollo de la fusión como fuente de energía comercialmente viable es el establecimiento de un marco regulador y de seguridad adecuado para los dispositivos de fusión. Durante 2021 se han puesto en marcha en China, los Estados Unidos de América, Europa y el Reino Unido una serie de iniciativas encaminadas a establecer un marco regulador específico para la fusión en el plano nacional. El Organismo también ha empezado a recopilar toda la información disponible en esta esfera para proporcionar orientación y prácticas óptimas a nivel internacional, con el objetivo último de fomentar la armonización de los marcos reguladores en el ámbito de la fusión.

### **Tendencias**

50. La creación de empresas de fusión apoyadas por capital privado se ha acelerado en los últimos siete años. Hay nuevas empresas por todo el mundo, sobre todo en los Estados Miembros que pertenecen al proyecto ITER (China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, India, Japón, República de Corea y Unión Europea), así como en el Reino Unido. Por otra parte, en 2020 se fundó, en la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia), una empresa emergente derivada. El modelo de alianzas financiadas por el sector público y el privado que se puso en marcha en los Estados Unidos de América ha demostrado ser muy exitoso y otros Estados Miembros están estudiando la posibilidad de replicarlo. En

el Sistema de Información de Dispositivos de Fusión<sup>1</sup> (figura A-12) se puede encontrar un panorama general de todos los dispositivos de fusión públicos y privados, con diseños experimentales y de demostración, que están actualmente en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación.

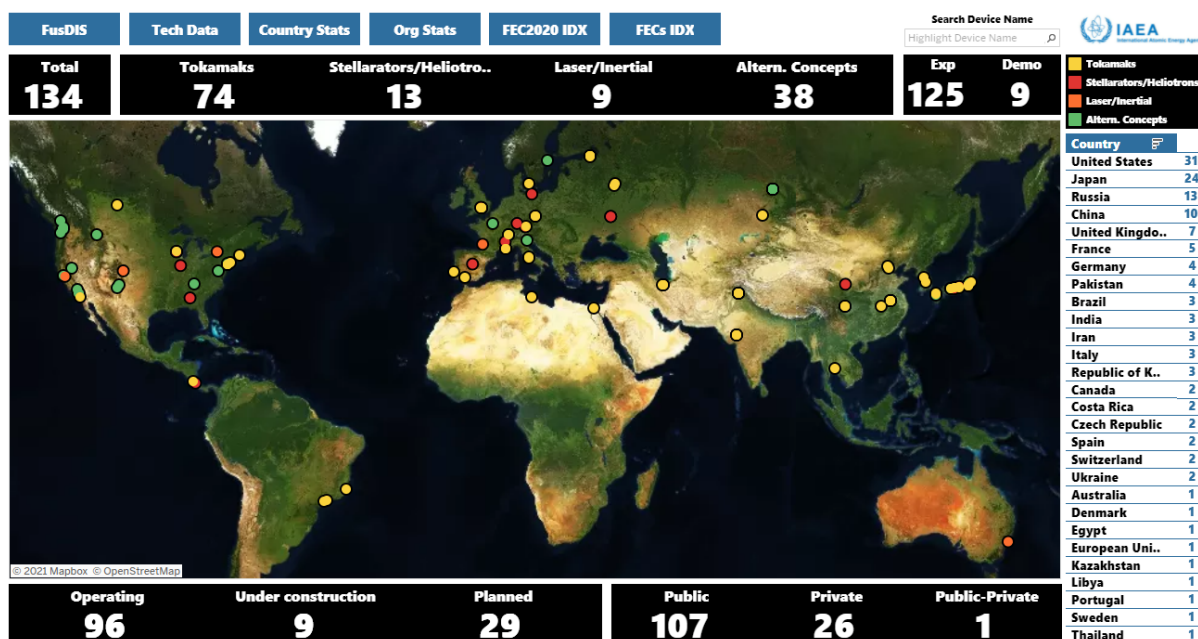


Fig. A-12. Hay más de 130 dispositivos de fusión experimentales, públicos y privados en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación, mientras que varias organizaciones están estudiando diseños de centrales de demostración de la fusión. (Fuente: Sistema de Información de Dispositivos de Fusión del OIEA)

51. La UKAEA ha puesto en marcha una ambiciosa iniciativa para demostrar que es posible generar electricidad neta a partir de la fusión de aquí a 2040, lo cual supondrá la construcción del Tokamak Esférico para la Producción de Energía (STEP). Esta central proporcionará conocimientos y experiencia en relación con el mantenimiento durante toda la vida operacional de la instalación y la autosostenibilidad del combustible. Está previsto aprobar el diseño conceptual de STEP para 2024, que en su primera fase será un tokamak esférico conectado a la red nacional y producirá energía neta, aunque no con fines comerciales. Se han asignado 222 millones de libras esterlinas (264 millones de euros) para iniciar las labores de diseño de STEP. Actualmente se están estudiando distintas ubicaciones en el Reino Unido, y se prevé adoptar una decisión definitiva para finales de 2022 (figura A-13).

<sup>1</sup> <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>.





Fig. A-13. Vista del edificio previsto para STEP. (Imagen: UKAEA)

## B. Ciclo del combustible nuclear

### B.1. Parte inicial

#### Situación

52. En el primer trimestre de 2021 el precio al contado del uranio rondaba los 26,50 dólares/lb de  $U_3O_8$ . Los precios sostenidos a este nivel obligaron a varios productores primarios a mantener sus operaciones en situación de cuidado y mantenimiento o a un ritmo de producción reducido<sup>2</sup>. Desde 2011 ha habido una oferta excesiva de uranio en el mercado. Sin embargo, debido a la constante demanda de uranio para combustible nuclear y a la reducción de la producción primaria, las existencias de  $U_3O_8$  a escala mundial han disminuido paulatinamente como consecuencia de los bajos precios sostenidos del mercado. La tendencia en la reducción de existencias fue notoria en 2020 y 2021.

53. La crisis persistente en la producción primaria mundial durante todo 2020 y entrado 2021 puso de manifiesto la fragilidad del mercado del uranio, lo que llevó a varios inversionistas, fondos, comerciantes y productores primarios de uranio a comprar  $U_3O_8$  en el mercado en respuesta al cambio previsto en la oferta y la demanda de  $U_3O_8$ . Por ejemplo, en octubre de 2021 Kazatomprom anunció su intención de participar en un fondo de uranio físico (denominado ANU Energy), que almacenará uranio físico como inversión a largo plazo. Esas compras de  $U_3O_8$  realizadas por un gran número de entidades de servicios públicos no nucleares a escala mundial es algo sin precedentes en los mercados de uranio. Como consecuencia de la disminución de las existencias y la aceleración del comercio de  $U_3O_8$  en 2021, para finales de octubre de ese año el precio al contado había aumentado en un 74 %, situándose en unos 46,00 dólares/lb de  $U_3O_8$ , desde el primer trimestre de 2021.

54. La producción de combustible nuclear es una tecnología consolidada que ha mejorado constantemente con los años gracias a la automatización y la digitalización, una reducción en la cantidad de desechos que genera la explotación, la mejora de la protección radiológica de los trabajadores y la disminución de los fallos del combustible en los reactores. Las actuales capacidades de fabricación de combustible nuclear son suficientes a escala mundial para cubrir la demanda prevista de energía

---

<sup>2</sup> Otro gran productor de uranio, Kazatomprom, de Kazajstán, anunció una disminución del 20 % en la producción proveniente de sus minas de lixiviación *in situ* de resultados de esta reducción en la producción que se mantuvo durante 2021.

nucleoeléctrica, y se están logrando grandes avances para demostrar el comportamiento seguro de los nuevos combustibles de tecnología avanzada diseñados para ser irradiados en la generación actual o en las próximas generaciones de reactores nucleares de potencia, entre ellos los SMR (por ejemplo, el diseño GAIA, de Framatome, que incluye combustible a prueba de accidentes mejorado PROtect, así como los conceptos de combustible tolerante a accidentes de Global Nuclear Fuels y de Westinghouse, que consisten en plaqueados revestidos con zircaloy y pastillas de  $UO_2$  dopadas; el modelo TVS-2M, de TVEL, con vaina de circonio con revestimiento de cromo y aleación de cromo-níquel; el combustible REMIX, de Rosatom, diseñado para el reciclaje múltiple de uranio y plutonio en reactores de agua ligera (LWR), y la tecnología de combustible ANEEL (Advanced Nuclear Energy for Enriched Life), de Clean Core, que utiliza una combinación de torio y uranio poco enriquecido de alta concentración para lograr un rendimiento mucho mejor del combustible en los reactores CANDU).

55. El Laboratorio Nuclear Nacional del Reino Unido (NNL) ha evaluado varios diseños de combustibles de tecnología avanzada desde el punto de vista de su madurez, sus aspectos económicos y su seguridad.

### **Tendencias**

56. El gasto en concepto de prospección de uranio ha disminuido de forma constante desde 2012 como consecuencia de los bajos precios sostenidos del uranio, situación agravada aún más desde principios de 2020 por la pandemia de COVID-19. Los recientes aumentos de los precios de mercado del uranio incentivaron en 2021 algunas inversiones que han incluido determinadas actividades renovadas de prospección y desarrollo, así como la reanudación de cierta producción primaria.

57. El marcado incremento del precio al contado del uranio en 2021 llevó a algunos explotadores<sup>3</sup> con minas de uranio e instalaciones de procesamiento en situación de cuidado y mantenimiento a estudiar la posibilidad de reanudar las operaciones. Una nueva reducción de las existencias mundiales de  $U_3O_8$  y un aumento sostenido del precio al contado del uranio pueden incentivar a otras minas de uranio e instalaciones de procesamiento que están en situación de cuidado y mantenimiento a reanudar sus operaciones y propiciar el desarrollo de nuevos proyectos de uranio con fines comerciales o para garantizar el suministro en el plano nacional<sup>4</sup>.

58. Es preciso innovar para que yacimientos marginales de uranio avancen hacia la producción. Un ejemplo actual de esa innovación en el sector de la extracción de uranio en 2021 fueron los resultados positivos alcanzados en los estudios de viabilidad para el desarrollo de una mina de lixiviación *in situ* en un yacimiento de alta ley asociado con una discordancia. Los métodos de biolixiviación son otra innovación importante que se está desarrollando para su uso en actividades de lixiviación *in situ* de uranio en yacimientos de tipo areniscas.

59. Desde 2011, los esfuerzos internacionales se han concentrado en mejorar la seguridad y el rendimiento de los combustibles utilizados en los LWR actuales. Otros impulsores del desarrollo de combustible nuclear son los diseños de reactores innovadores, como los reactores de la Generación IV y los SMR (que van desde versiones reducidas de diseños de combustible para LWR hasta diseños completamente nuevos de combustible para la Generación IV), algunos de los cuales ya son aptos para demostraciones (como el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) en China), así como la mejora de los aspectos económicos y la sostenibilidad de la energía nucleoelectrica (la

---

<sup>3</sup> Por ejemplo, la mina de uranio Langer Heinrich, en Namibia, anunció en octubre que está trabajando en los elementos del camino crítico necesarios para reanudar las actividades en la mina de uranio y la instalación de procesamiento.

<sup>4</sup> Un ejemplo de ello es el proyecto Badrakh Energy, en Mongolia, que en julio anunció que había comenzado a realizar pruebas piloto en su yacimiento de Zuuvch Ovoo. Además, en julio, la Empresa de Extracción de Uranio de Jordania anunció la puesta en servicio total de su planta de demostración, capaz de procesar 70 toneladas de mena por año. Los resultados de esas pruebas se utilizarán para evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de esos yacimientos y si evolucionarán hacia la producción a gran escala.

prolongación de los ciclos de irradiación del combustible, unos grados de quemado más elevados, campañas de cero defectos, métodos innovadores para la fabricación de combustible, nuevos ciclos del combustible y el reciclaje múltiple de materiales nucleares a partir de combustible nuclear gastado). El uranio poco enriquecido de alta concentración es necesario para fabricar muchos conceptos innovadores de combustible nuclear, como los combustibles de tecnología avanzada o los combustibles para SMR.

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

### **Situación**

60. 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 rondan las 300 000 t HM. Para los países con programas nucleares establecidos desde hace tiempo que siguen estrategias de ciclo abierto, los principales retos son la necesidad de contar con capacidad adicional de almacenamiento del combustible nuclear gastado, así como la duración cada vez mayor de este almacenamiento (por encima de los 100 años).

61. El combustible nuclear gastado se traslada del almacenamiento en húmedo al almacenamiento en seco tras un tiempo de enfriamiento inicial. Como las reducciones en el tiempo de enfriamiento inicial son cada vez más comunes, los sistemas de almacenamiento en seco requieren una mayor capacidad de evacuación del calor<sup>5</sup>. Se han concedido licencias a nuevas instalaciones centralizadas de almacenamiento en Ucrania y los Estados Unidos de América. En algunos países el combustible nuclear gastado se transporta y se aplican sistemáticamente medidas para mejorar su transporte. Los Estados Miembros siguen retirando y reubicando el combustible nuclear gastado en el marco de los proyectos de clausura de sus centrales nucleares. Investigadores de la República Checa han desarrollado y patentado una tecnología innovadora denominada Teplator para aprovechar el calor resultante del decaimiento radiactivo producido por el combustible gastado para calentar agua<sup>6</sup>.

62. Se prevén avances hacia la implementación del reciclaje: en Francia, ya es una actividad consolidada a escala industrial; en el Japón, la Federación de Compañías de Energía Eléctrica (FEPC) planea utilizar combustible de óxidos mixtos (MOX) en al menos 12 unidades para 2030<sup>7</sup>; en la Federación de Rusia está terminando de construirse una instalación piloto de demostración en el Complejo Minero y Químico de Krasnoyarsk, para probar nuevas tecnologías de reprocesamiento del combustible nuclear gastado para su ulterior despliegue a gran escala<sup>8</sup>; en los Estados Unidos de América Oklo y el Laboratorio Nacional Argonne han aunado esfuerzos para realizar actividades de investigación y desarrollo de tecnologías de electrorrefinación a fin de reciclar combustible para su uso en centrales nucleares de fisión avanzadas<sup>9</sup>.

---

<sup>5</sup> En mayo, los últimos conjuntos combustibles gastados de la central nuclear de Oyster Creek se almacenaron en seco 32 meses después de que el reactor se pusiera en régimen de parada definitiva, lo que supone un tiempo récord para la retirada del combustible. La campaña de carga de cofres se completó de forma segura en un lapso de 21 semanas.

<sup>6</sup> En abril, investigadores de la Universidad Técnica Checa de Praga y de la Universidad de Bohemia Occidental de Pilsen presentaron una solución innovadora patentada que utiliza el calor resultante del decaimiento radiactivo producido por las barras de combustible gastado para calentar agua.

<sup>7</sup> En febrero, la FEPC revisó un plan de utilización del plutonio basado en el último plan operativo de la Planta de Reprocesamiento de Rokkasho y la planta de fabricación de combustible MOX, y los cambios en el entorno comercial habidos en el entorno empresarial en el último año.

<sup>8</sup> Además, en la Federación de Rusia se está trabajando para construir infraestructura para demostrar el cierre del ciclo del combustible nuclear con reactores rápidos. Desde 2017 se está realizando la producción industrial de combustible de MOX para el reactor rápido BN-800 en la Federación de Rusia, y el combustible nuclear para los reactores RBMK y VVER se fabrica con uranio regenerado.

<sup>9</sup> En junio, el Departamento de Energía de los Estados Unidos otorgó financiación al Laboratorio Nacional Argonne para que iniciara actividades de investigación y desarrollo de refinación electrolítica para el combustible reciclado para su uso en centrales nucleares de fisión avanzadas. Oklo igualó el monto de la financiación.



63. En varios países (por ejemplo, la China, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, la República de Corea) los proyectos de I+D continúan estudiando la compartimentación selectiva de actínidos menores para su ulterior transmutación en reactores rápidos y/o sistemas subcríticos a fin de reducir al mínimo la carga de los desechos nucleares de actividad alta.

64. El NNL del Reino Unido publicó su hoja de ruta, en la que se describe la importancia de los adelantos en el ciclo del combustible nuclear avanzado en apoyo de la energía nuclear en un futuro en que se utilice energía con bajas emisiones de carbono.

### **Tendencias**

65. Conocer el comportamiento del combustible nuclear gastado en distintos sistemas de almacenamiento y los mecanismos de envejecimiento y degradación de las estructuras, sistemas y componentes del almacenamiento sigue siendo fundamental para garantizar la posibilidad de seguir almacenando ese combustible de forma segura y su ulterior transporte a las instalaciones de disposición final o a las plantas de reprocesamiento de combustible. El Organismo coordina las actividades de investigación a este respecto para recopilar la experiencia operacional de los Estados Miembros y promover el intercambio de información.

66. El aumento de la eficiencia en la gestión de los reactores nucleares ha permitido, con el tiempo, reducir la cantidad de combustible nuclear gastado que se descarga de los reactores. Ahora bien, la tendencia hacia grados de enriquecimiento inicial y de quemado más elevados se traduce en un mayor calor residual y un aumento del riesgo de fragilización de las vainas, lo que puede repercutir en las etapas de gestión del combustible nuclear gastado.

67. Habrá que investigar para gestionar los combustibles nucleares gastados sobre la base de los nuevos diseños (por ejemplo, los combustibles de tecnología avanzada evolutivos y los de uranio poco enriquecido de alta concentración) con enriquecimientos más elevados en uranio 235 (hasta el 20 %) y con nuevos materiales para las vainas, en particular en relación con mayores cargas térmicas y comportamientos del combustible potencialmente diferentes a largo plazo.

68. Los procesos avanzados de reciclaje múltiple del plutonio (REMIX en Rusia, y CORAIL y MIX en Francia) en los LWR se están sometiendo a pruebas de demostración a fin de posibilitar en el futuro la transición a estrategias de reciclaje múltiple del plutonio en los reactores rápidos.

69. Existe un interés cada vez mayor en el desarrollo de SMR sobre la base de diferentes diseños que se desplegarán más o menos en los próximos 10 años, para lo cual será necesario desarrollar un ciclo de combustible conexo que sea sostenible y seguro desde el punto de vista físico y tecnológico.

70. Este esfuerzo se aplica a las iniciativas en curso que tienen como objetivo avanzar hacia la implementación de reactores avanzados que precisarán ciclos de combustible avanzados conexos que sean sostenibles y física y tecnológicamente seguros.

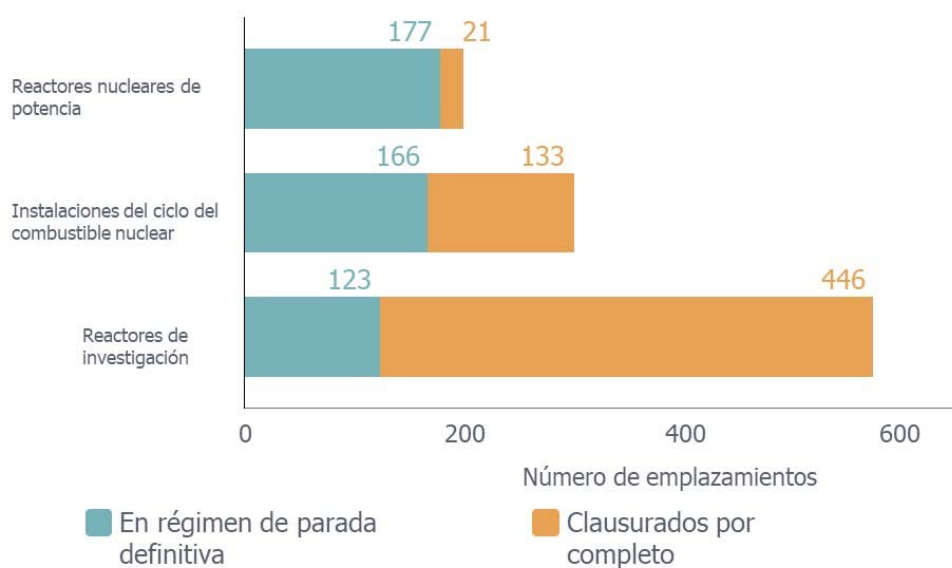
## C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos

### C.1. Clausura

#### Situación

71. En 2021 fueron puestos en régimen de parada definitiva cinco reactores nucleares: Dungeness B1 y B2 en el Reino Unido, Indian Point-3 en los Estados Unidos de América, KANUPP-1 en el Pakistán y Kuosheng-1 en Taiwán (China). Esta cifra concuerda en líneas generales con el número de reactores puestos en parada definitiva en los últimos diez años, período durante el cual se retiraron del servicio 57 reactores (de los cuales, 18 se encuentran en el Japón y 12 en los Estados Unidos de América). El Reino Unido puso en régimen de parada definitiva los dos primeros reactores, Dungeness B1 y B2, de su parque de reactores avanzados refrigerados por gas; el resto de reactores se someterán al mismo proceso previsiblemente antes de que termine el decenio actual. El reactor de tipo CANDU KANUPP-1 es el primero del parque de reactores del Pakistán que se pone en régimen de parada definitiva.

#### Situación de los reactores nucleares de potencia, las instalaciones del ciclo del combustible nuclear y los reactores de investigación



72. En noviembre de 2021 se rescindió la licencia para la unidad 3 de la Central Nuclear Humboldt Bay en California (Estados Unidos de América), y se levantó el control reglamentario del emplazamiento para poder darle un uso irrestricto. Con ello, el número de reactores nucleares de potencia clausurados por completo ascendió a 21, con otros 177 reactores, que representan aproximadamente el 28 % del parque mundial de reactores<sup>10</sup>, en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura. Además, 166 instalaciones del ciclo del combustible nuclear están en régimen de parada definitiva o en fase de clausura, y 133 instalaciones se han clausurado por completo. Asimismo, 123 reactores de investigación se han puesto en régimen de parada definitiva o se encuentran actualmente en proceso de clausura, y 446 se

<sup>10</sup> El parque mundial de reactores comprende 442 reactores (69 %) en funcionamiento, 177 reactores (28 %) en régimen de parada definitiva y 21 reactores (3 %) clausurados por completo.

han clausurado por completo. Los programas de clausura de reactores de potencia más importantes en la actualidad se están llevando a cabo en Alemania, donde hay 27 reactores en régimen de parada definitiva o en fase de clausura; en el Japón, que tiene 26 reactores en régimen de parada definitiva o en fase de clausura, y en los Estados Unidos, donde hay 25 reactores en régimen de parada definitiva o en fase de clausura.

73. Se están logrando avances en los emplazamientos de reactores nucleares que sufrieron accidentes graves, incluida la central nuclear de Fukushima Daiichi en el Japón, en la que se produjo un accidente tras el gran terremoto del Japón oriental en 2011 (figura C-1). Continúan según el calendario previsto las actividades de retirada del combustible gastado de las piscinas de combustible gastado de las unidades 1 a 4 de Fukushima Daiichi, actividades que actualmente se centran en las unidades 1 y 2 (en las unidades 3 y 4 ya han finalizado). Asimismo, en agosto de 2021 se logró un hito importante en la unidad 4 dañada de la central nuclear de Chornóbil (Ucrania) al obtenerse una licencia de explotación para el Nuevo Confinamiento Seguro (figura C-2). En diciembre de 2020 se transfirió la clausura de la unidad 2 de Three Mile Island (Estados Unidos de América) a un consorcio de especialistas en clausura; la clausura de la instalación dañada ya ha comenzado y está previsto que finalice en 2037.



*Fig. C-1. Gestión del combustible gastado en la central nuclear de Fukushima Daiichi*

74. Por lo que respecta a las actividades de clausura en las instalaciones del ciclo del combustible, un precursor importante del desmantelamiento de las instalaciones es, por lo general, la retirada de los desechos históricos, que suelen estar almacenados en estanques o en zanjas de hormigón. Se siguen realizando avances importantes en relación con este aspecto de la clausura en grandes instalaciones, incluida la retirada de lodos de las antiguas piscinas de almacenamiento de combustible en Sellafield (Reino Unido); la retirada de desechos históricos de grafito y magnesio almacenados en silos de hormigón en La Hague (Francia); la demolición de edificios y la retirada de losas de hormigón de los cimientos en la planta de difusión gaseosa de Oak Ridge (Estados Unidos de América), y la demolición de varios edificios con contaminación radiactiva utilizados anteriormente por la planta radioquímica de la Asociación de Producción Mayak (Federación de Rusia).

75. Los reactores de investigación en proceso de clausura se encuentran principalmente en Alemania, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón y el Reino Unido. En Escandinavia se están ejecutando varios proyectos de clausura de reactores de investigación. En 2021 se alcanzó un hito importante en el reactor FiR-1 de Finlandia con el transporte del combustible irradiado del reactor a los Estados Unidos de América. Otro ejemplo de avance fue el protagonizado por el

Instituto de Investigación y Desarrollo de Oarai del Organismo de Energía Atómica del Japón, en la prefectura de Ibaraki, donde en marzo de 2021 se aprobó el plan de clausura del reactor de ensayo de materiales del Japón (JMTR). El calendario completo de desmantelamiento se dividió en cuatro etapas y la primera ya ha comenzado.



*Fig. C-2. En una ceremonia con motivo del 35° aniversario del accidente nuclear de Chernóbil, el Director General Rafael Mariano Grossi rinde homenaje a las víctimas frente al Nuevo Confinamiento Seguro.*

### **Tendencias**

76. Se prevé que muchas de las cuestiones que han llevado a la parada de instalaciones nucleares en los últimos diez años —factores políticos y económicos, costos de mantenimiento y/o renovación, y las condiciones del mercado eléctrico— sigan existiendo en el futuro y, de hecho, es posible que se acelere la tasa de paradas debido al perfil de edad de los parques actuales, compensado en parte por la prolongación de la vida útil. Una gran mayoría de los aproximadamente 300 reactores nucleares de potencia que actualmente tienen 30 años o más pueden ser retirados del servicio en los próximos tres decenios. Se prevé una evolución similar en el caso de los reactores de investigación, ya que estos tienen un perfil de edad muy similar.

77. Hay una tendencia al alza en favor del desmantelamiento temprano de las instalaciones una vez que se han puesto en régimen de parada definitiva. La selección de una estrategia de desmantelamiento inmediato suele verse influida por la política gubernamental; por ejemplo, Alemania y Francia han aplicado políticas que favorecen claramente este enfoque. También es probable que las incertidumbres sobre los costos en relación con proyectos que se ejecutarán en un futuro lejano sean un factor importante para los propietarios de las instalaciones, muchos de los cuales prefieren evitar deudas a largo plazo con altos niveles de incertidumbre. Este parece ser un factor determinante de la tendencia actual en los Estados Unidos de América, que se aleja de las estrategias de desmantelamiento diferido.

78. El desmantelamiento diferido ha sido tradicionalmente la estrategia preferida para los reactores moderados por grafito debido a la falta de estrategias generalmente aceptadas para la gestión a largo plazo del grafito irradiado, y también porque el tamaño de estos reactores suele ser mucho mayor que el de los reactores moderados por agua y, por lo tanto, las actividades de desmantelamiento tienen un nivel de complejidad significativamente mayor. Sin embargo, incluso en el caso de estos reactores, las

tendencias actuales parecen favorecer un enfoque de desmantelamiento más inmediato. Por ejemplo, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares del Reino Unido ha decidido adoptar una estrategia de clausura específica para cada uno de sus emplazamientos de reactores Magnox, y se está procediendo al desmantelamiento temprano de los reactores de Dungeness A y Trawsfynydd sobre la base del principio de “liderar y aprender”. La central nuclear de Ignalina está llevando a cabo el desmantelamiento inmediato de su instalación, incluido el establecimiento de una instalación de almacenamiento para el grafito irradiado a la espera del desarrollo de una instalación de disposición final geológica a largo plazo en Lituania.

## **C.2. Rehabilitación ambiental**

### **Situación**

79. La rehabilitación ambiental engloba soluciones para hacer frente a la contaminación de zonas terrestres (suelo y aguas subterráneas) causada por prácticas de gestión inadecuadas adoptadas en el pasado. Entre los antiguos emplazamientos se pueden encontrar emplazamientos nucleares (incluidas instalaciones redundantes de investigación y del ciclo del combustible), antiguos emplazamientos de ensayos nucleares, emplazamientos afectados por operaciones de extracción y tratamiento de uranio llevadas a cabo en el pasado, así como por otras actividades que entrañan el uso de material radiactivo natural (NORM), o emplazamientos afectados por accidentes nucleares o radiológicos graves. La industria nuclear ha dejado su huella en 31 países, sin incluir los emplazamientos de extracción y procesamiento de uranio.

80. En la mayoría de estos países la huella es más bien reducida; sin embargo, hay algunos países con industrias nucleares consolidadas, que abarcan tanto el sector civil como el militar, donde las operaciones nucleares, incluida la generación de electricidad, el reprocesamiento y procesos experimentales, coexisten con instalaciones redundantes, desechos nucleares y antiguos emplazamientos. Aun así, la contaminación de terrenos por operaciones nucleares en Europa, por ejemplo, representa solo el 0,1 % del terreno contaminado en el continente. A escala mundial se reconoce cada vez más la necesidad de buscar soluciones para los emplazamientos afectados por las industrias relacionadas con los NORM.

81. En los Estados Unidos de América se puso en marcha en 2020 la instalación de procesamiento de desechos salinos del río Savannah y se completaron las actividades de descontaminación y clausura del Parque Tecnológico de East Tennessee, en Oak Ridge. En 2022, la Oficina de Gestión Ambiental del Departamento de Energía tiene previsto ocuparse de la contaminación de las aguas subterráneas con cromo en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y finalizar la exhumación selectiva de desechos enterrados en el emplazamiento del Laboratorio Nacional de Idaho.

82. En el Japón, las actividades de descontaminación derivadas del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi prosiguen a buen ritmo. La descontaminación de toda la Zona Especial de Descontaminación finalizó según lo previsto. También se finalizó la descontaminación llevada a cabo por los municipios en la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación, lo que quiere decir que se ha completado la labor de descontaminación de toda la zona sobre la base de lo dispuesto en la Ley de Medidas Especiales relativas al Tratamiento de la Contaminación Radiactiva, excluida la Zona de Acceso Restringido. Las tasas de dosis en aire en el medio ambiente han ido disminuyendo de forma continua. A finales de abril de 2021 se habían transportado a la instalación de almacenamiento provisional aproximadamente 10 730 000 m<sup>3</sup> de tierra y desechos retirados. Está previsto que la práctica totalidad de la tierra retirada se entregue a dicha instalación antes de finales de marzo de 2022.

### **Tendencias**

83. En algunos países, la rehabilitación se ha estancado debido a la falta de recursos. Por este motivo, la financiación de la rehabilitación es un desafío clave. La comunidad internacional, encabezada por la Unión Europea, estableció la Cuenta para la Rehabilitación Ambiental de Asia Central. Es necesario



cubrir el déficit de fondos para poder financiar la labor urgente que ha de realizarse en los antiguos emplazamientos de extracción de uranio de la región. A septiembre de 2021, el déficit se estimaba en 40 millones de euros. Sin embargo, depender únicamente de fondos públicos puede no ser suficiente para llevar a cabo todas las medidas de rehabilitación necesarias. Así pues, un desafío importante es la creación de nuevos mecanismos financieros creativos para la rehabilitación, en particular iniciativas que puedan promover la movilización de capital privado.

84. Existe una tendencia hacia mecanismos de toma de decisiones inclusivos, pero es necesario dejar claras las funciones y responsabilidades de los agentes y mejorar la coordinación; entablar un diálogo con las partes interesadas locales para abordar mejor la noción de territorio/comunidad afectados, y anticipar los protocolos de gestión correspondientes. La ciencia ciudadana puede entenderse como la práctica de la participación y colaboración del público en la investigación científica a fin de aumentar los conocimientos científicos. Entre otras cosas, permite a las personas vigilar sus propios hogares y entornos, y repercute en la relación de las personas con el gobierno y otras instituciones clave. Las organizaciones nacionales e internacionales deberán estar preparadas para tratar esta cuestión en el proceso de toma de decisiones participativas y de políticas.

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

#### **Situación**

85. En 2021 el Gobierno de Australia anunció planes para construir una instalación nacional de almacenamiento de desechos nucleares en Napandee (Australia Meridional). En la instalación se someterán a disposición final permanente desechos radiactivos de actividad baja y se almacenarán temporalmente desechos de actividad intermedia. Del mismo modo, en Italia está teniendo lugar un proceso de identificación de zonas adecuadas para un repositorio nacional para la disposición final de 78 000 m<sup>3</sup> de desechos de actividad muy baja y baja, y para el almacenamiento provisional a largo plazo de aproximadamente 17 000 m<sup>3</sup> de desechos de actividad intermedia y de actividad alta. El repositorio será una instalación cerca de la superficie con un parque tecnológico para la realización de actividades de investigación en el ámbito nuclear.

86. Algunos Estados Miembros avanzaron considerablemente en 2021 hacia las etapas finales de la disposición final en sus instalaciones de desechos de actividad baja. En Eslovaquia se ha concedido la aprobación para la cubierta definitiva para los desechos de actividad muy baja en la instalación de disposición final de Mochovce. En el Reino Unido se han llevado a cabo este año actividades preparatorias que permitirán la colocación de la cubierta sobre los desechos en la cámara 8 y parte de las zanjas en el emplazamiento del repositorio de desechos de actividad baja. Además, también se está estudiando si el emplazamiento podría utilizarse para albergar una instalación de disposición final cerca de la superficie, y se están llevando a cabo investigaciones del lecho rocoso subyacente (figura C-3).



*Fig. C-3. Actividades preparatorias en el repositorio de desechos de actividad baja del Reino Unido para apoyar la colocación de la cubierta definitiva sobre parte de la instalación. (Fotografía: Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares del Reino Unido, 2021)*

87. También pueden observarse avances importantes hacia la aplicación de programas de repositorios geológicos profundos para desechos de actividad alta. Por ejemplo, la organización finlandesa de gestión de desechos Posiva presentó una solicitud de concesión de licencia para operaciones en diciembre de 2021 y planos para la primera disposición final de combustible gastado en el repositorio geológico profundo Onkalo a mediados de 2023. La Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares está a la espera de una decisión gubernamental para iniciar la construcción y los estudios de confirmación del subsuelo en el emplazamiento propuesto para su repositorio geológico profundo. Se espera que la Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos de Francia presente en 2022 su solicitud de licencia para la construcción de una instalación de disposición final geológica profunda de desechos de actividad alta e intermedia. La Cooperativa Nacional para la Disposición Final de Desechos Radiactivos de Suiza y la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares del Canadá también han puesto en marcha actividades relacionadas con la selección de un emplazamiento que albergue un repositorio geológico profundo para combustible gastado.

88. Los avances en estos Estados Miembros han sido posibles tras muchos decenios de actividades de I+D llevadas a cabo principalmente en instalaciones subterráneas de investigación (URF). Actualmente hay 13 URF en funcionamiento. China empezó en junio de 2021 a construir el laboratorio de investigación subterráneo de Beishan y abrió a la cooperación internacional el futuro programa de investigación, desarrollo y demostración de URF en calidad de centro colaborador del Organismo para la disposición final geológica.

89. En 2021 se lograron importantes avances en la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso, concretamente en lo que respecta a la recuperación y el acondicionamiento. En Jordania se recuperaron de un pozo de almacenamiento subterráneo fuentes radiactivas en desuso heredadas, que se acondicionaron en nuevos bultos de desechos (figura C-4).



*Fig. C-4. Recuperación de fuentes radiactivas y acondicionamiento en nuevos bultos de desechos en un emplazamiento de almacenamiento de desechos heredados en Jordania.  
(Fotografías: Comisión de Energía Atómica de Jordania)*

## **Tendencias**

90. Un número considerable de Estados Miembros inició o retomó la elaboración de una política y estrategias nacionales de gestión de desechos radiactivos en los últimos años, con avances significativos durante 2021. A lo largo del año, el Gobierno canadiense estuvo en contacto con el público, incluidos los pueblos indígenas, las partes interesadas y expertos, para examinar y modernizar la política de desechos radiactivos del Canadá. En el Reino Unido, la compañía Low Level Waste Repository pasó a ser en julio de 2021 una filial directa de la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares, en consonancia con la nueva estrategia nacional de esta institución para gestionar los desechos existentes y previstos resultantes de las actividades de clausura.

91. Cada vez es más necesario ampliar la capacidad de almacenamiento y disposición final de todos los tipos de desechos radiactivos, y se prevé que esta tendencia se acelere a medida que se vaya llevando a cabo la clausura prevista de más centrales nucleares en los próximos diez años. Para responder a esta necesidad se están presentando una serie de solicitudes de licencia y se están llevando a cabo nuevas construcciones. Por ejemplo, en 2020 la Comisión de Seguridad Nuclear Tecnológica y Física de la República de Corea aprobó la construcción de espacio adicional para el almacenamiento provisional de combustible gastado en la central nuclear Wolsong, ya que la instalación de combustible gastado existente está alcanzando su capacidad máxima.

92. En los últimos decenios también ha habido un aumento constante de la atención prestada a una comunicación con el público continua y bien planteada. A raíz de la pandemia de COVID-19, los Estados Miembros llevaron a cabo una gran labor para dar participación a las partes interesadas utilizando medios virtuales, lo que se tradujo en una mayor difusión (por ejemplo, el seminario nacional de apoyo al proceso de selección de emplazamientos para el repositorio nacional que tuvo lugar en Italia se transmitió en línea).

93. Si bien muchos países han avanzado en lo que respecta a la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso (DSRS), la disposición final de estas fuentes sigue siendo un desafío, especialmente en países con programas nucleares más pequeños. Malasia tiene previsto iniciar en 2022 la disposición final de DSRS en pozos barrenados. Se está observando un aumento en la devolución de fuentes de actividad alta en desuso a los proveedores para su reciclaje y disposición final. Está prevista para 2022 la retirada de más de 50 fuentes de actividad alta en más de una docena de Estados Miembros.

94. La colaboración internacional sigue aumentando en el ámbito de la gestión de desechos radiactivos, especialmente para los programas de disposición final geológica profunda. La Plataforma Tecnológica para el Almacenamiento Definitivo Geológico de la Unión Europea, puesta en marcha en 2009, sigue trabajando activamente para hacer realidad su informe “Vision 2025”, en el que se expone en detalle la visión de que para 2025 estén en funcionamiento seguro en Europa las primeras instalaciones de disposición final geológica de combustible gastado, desechos de actividad alta y otros desechos radiactivos

de período largo. Al mismo tiempo, ERDO, antes conocida como Organización Europea para el Desarrollo de Repositorios y desde 2021 establecida como Asociación para Soluciones Multinacionales para Desechos Radiactivos, prosigue el estudio sobre el establecimiento de uno o varios repositorios geológicos compartidos en Europa.

## D. Reactores de investigación y aceleradores de partículas

### D.1. Reactores de investigación

#### Situación

95. Al final de 2021 había 235 reactores de investigación en funcionamiento, incluidos los que estaban en régimen de parada temporal, en 53 países. Estos reactores siguieron proporcionando haces de neutrones y servicios de irradiación indispensables para la ciencia, la medicina y la industria, y contribuyendo a la enseñanza y la capacitación. Sus aplicaciones más frecuentes se indican en el cuadro D-1 del anexo.

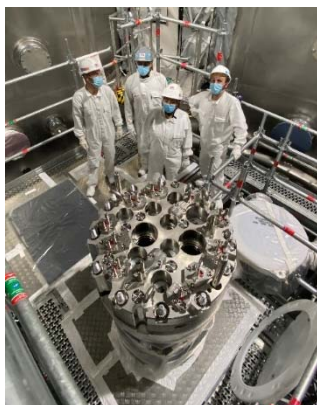


96. Se están construyendo once nuevos reactores de investigación en diez países: Arabia Saudita, Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Brasil, China, Federación de Rusia, Francia, República Checa, República de Corea y Ucrania (figuras D-1 a, D-b y D-1c). En 2021 se llevó a cabo el primer vertido de hormigón para construir el primer reactor de investigación en el Estado Plurinacional de Bolivia, y el reactor PIK de la Federación de Rusia entró en la etapa final de pruebas para la puesta en servicio. Sudáfrica formalizó los planes para construir un nuevo reactor de investigación; los Estados Miembros que actualmente tienen planes de ese tipo son Bangladesh, Belarús, Bélgica, China, los Estados Unidos de América, Filipinas, la India, Nigeria, los Países Bajos, Sudáfrica, Tailandia, Tayikistán, Viet Nam y Zambia. Un número importante de países está estudiando la posibilidad de construir reactores de investigación, a saber: Azerbaiyán, Etiopía, Filipinas, Ghana, Irak, Kenya, India, Malasia, Mongolia, Myanmar, Níger, República Unida de Tanzania, Rwanda, Senegal, Sudán y Túnez.





*Fig. D-1 a. Construcción del reactor de investigación RA-10 en el Centro Atómico Ezeiza de la Argentina. (Fotografía: CNEA)*



*Fig. D-1 b. Instalación de la tapa de la vasija del reactor Jules Horowitz en Cadarache (Francia). (Fotografía: CEA)*



*Fig. D-1 c. Instalación de piso de losa en la base de la cavidad del reactor MBIR. Instituto de Investigación de Reactores Atómicos, Centro Científico Estatal, Dimitrovgrad (Federación de Rusia) (Fotografía: Rosatom)*

97. Prosiguieron los esfuerzos internacionales por reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME) en el sector civil. Hasta la fecha, 6826 kg de UME provenientes de 48 países (y Taiwán (China)) se han repatriado a sus países de origen o se han dispuesto de otro modo. Además, 107 reactores de investigación e importantes instalaciones de producción de isótopos de uso médico han pasado de utilizar UME a utilizar uranio poco enriquecido (UPE), o se ha confirmado que están en régimen de parada. Se lleva a cabo una amplia labor de I+D a fin de desarrollar nuevos combustibles de UPE de alta densidad para los reactores de investigación de alto rendimiento. El Instituto de Radioelementos de Bélgica sigue avanzado según lo previsto con miras a lograr la plena conversión al uso de UPE en la producción de molibdeno 99 en 2022, momento a partir del cual todos los productores mundiales de ese isótopo de uso médico con tanta demanda utilizarán métodos de producción sin UME. La Administración Nacional de Seguridad Nuclear del Departamento de Energía de los Estados Unidos adjudicó por concurso tres nuevos acuerdos de cooperación de participación en la financiación de gastos a empresas privadas para la producción sin UME de molibdeno 99 a escala comercial para finales de 2023.

## **Tendencias**

98. La proporción de reactores de investigación en funcionamiento desde hace al menos 50 años se está acercando al 50 %. Para garantizar que se siguen operando de forma segura y fiable y que se utilizan mejor, muchas instalaciones han establecido estrategias proactivas y una gestión del envejecimiento, una renovación y una modernización sistemáticas, o están en proceso de hacerlo. Algunas entidades que explotan reactores de investigación con un alto grado de utilización están preparando o considerando la prórroga de su vida útil a 80 o incluso 100 años (figura D-2). Uno de los ejemplos más comunes es la sustitución de sistemas de instrumentación y control analógicos obsoletos por nuevos sistemas digitales.

99. Muchos países aprovechan las oportunidades de acceso a los reactores de investigación por medio de iniciativas de colaboración internacionales y regionales. En 2021, dos Reactores-Laboratorio por Internet con reactores anfitriones en la República Checa y la República de Corea comenzaron a transmitir experimentos a estudiantes de otros países, y se puso en marcha la Plataforma Educativa Europea Experimental sobre Energía Nuclear, que ofrece capacitación práctica en reactores de investigación pequeños a universidades y jóvenes profesionales del sector nuclear de todo el mundo.



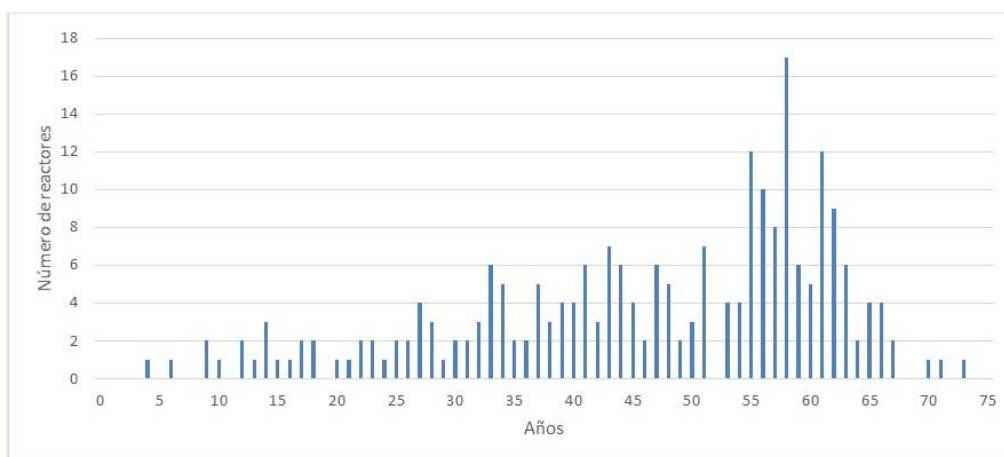


Fig. D-2. Distribución por edad de los reactores de investigación en explotación, noviembre de 2021.  
(Fuente: Base de Datos de Reactores de Investigación del OIEA)

100. La dispersión neutrónica se utiliza en todo el mundo para hacer frente a una serie de desafíos, entre ellos, los que se plantean en las ciencias biológicas y de la salud para proporcionar información sobre la función biológica, incluidos los virus, las proteínas y las enfermedades degenerativas, y para ayudar al desarrollo de nuevos fármacos y enfoques terapéuticos. Ayuda a comprender los procesos relacionados con la producción, la contaminación, la purificación y la conservación de los alimentos y el agua. También desempeña un papel importante en el estudio de nuevas fuentes de energía para proteger el medio ambiente y combatir el cambio climático, por ejemplo el almacenamiento de hidrógeno, las pilas de combustible, las células solares y nuevos tipos de baterías, y se utiliza en muchas otras aplicaciones de I+D, industriales y de ingeniería. Aunque las actividades de I+D punteras realizadas con los más modernos instrumentos de dispersión neutrónica se suelen llevar a cabo en fuentes neutrónicas de alto flujo y rendimiento, recientes avances tecnológicos en las fuentes neutrónicas compactas basadas en aceleradores, especialmente con la incorporación de entornos de muestras avanzados *in situ*, están abriendo nuevas oportunidades en el ámbito de la dispersión neutrónica en los reactores de investigación de flujo medio y las fuentes neutrónicas basadas en aceleradores.

## D.2. Aceleradores de partículas e instrumentación

### Situación

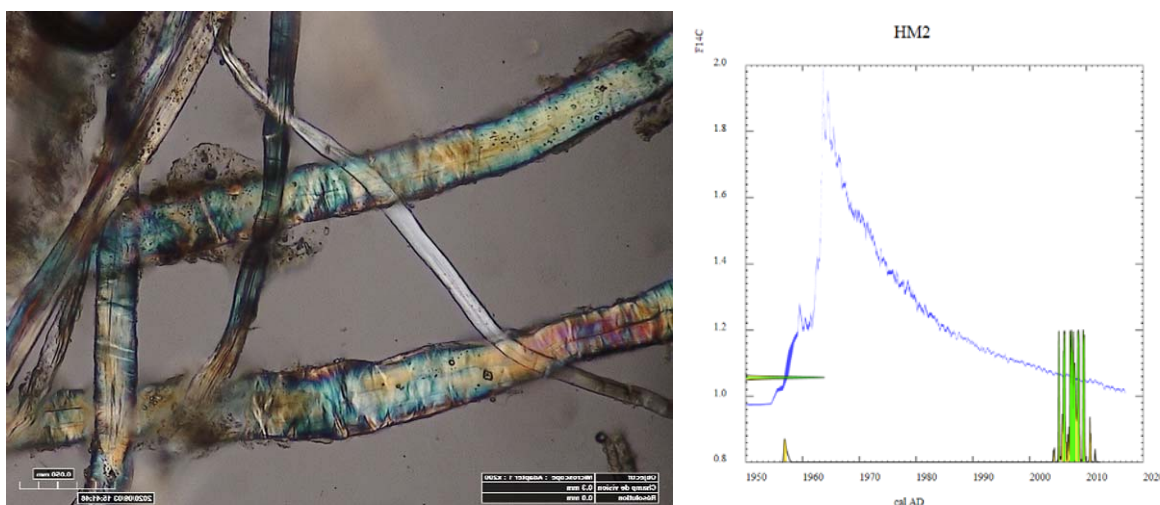
101. Los reactores de investigación son desde hace mucho tiempo las fuentes neutrónicas más potentes disponibles para realizar investigaciones con haces de neutrones. Sin embargo, las limitaciones inherentes a los reactores en estado estacionario, sumadas a la reducción del uso de UME con fines civiles, han hecho que los reactores de investigación no hayan experimentado mejoras significativas del rendimiento en cuanto al flujo neutrónico. Debido a las constantes mejoras en muchas esferas de la tecnología, las fuentes neutrónicas basadas en aceleradores han comenzado a poner en tela de juicio la función que desempeñan los reactores de investigación.

102. Está previsto que la Fuente Europea de Espalación (ESS), que se está construyendo cerca de Lund (Suecia) con el apoyo de 13 Estados Miembros participantes, entre en funcionamiento en 2023. El flujo integrado en el tiempo de la ESS la convertirá en la fuente neutrónica más brillante del mundo, arrebatando ese estatus al Reactor de Alto Flujo del Instituto Laué-Langevin en Grenoble (Francia), tras haberlo sido durante casi medio siglo. El blanco de espalación productor de neutrones de la ESS es una rueda rotatoria de tungsteno refrigerada por helio sobre la que un acelerador lineal de protones de 5 MW (promedio) suministra un haz de protones pulsado de 2 GeV.

## Tendencias

103. La espectrometría de masas con aceleradores (AMS) ha demostrado ser no solo una técnica ultrasensible para el recuento de átomos individuales, sino también un método basado en aceleradores con gran potencial para aplicaciones analíticas relacionadas con los problemas de la sociedad moderna. La AMS se utiliza actualmente en arqueología, aplicaciones biomédicas, estudios sobre el cambio climático, hidrología, oceanografía y muchos otros ámbitos de creciente interés social y económico. La AMS también puede ser un instrumento muy potente para las aplicaciones de reglamentación en la esfera nuclear, especialmente para las instalaciones de desechos radiactivos. Como se ha demostrado en los últimos cinco años, la AMS se ha utilizado para encontrar soluciones a grandes problemas relacionados con la clausura y la seguridad a largo plazo de las instalaciones nucleares, como la caracterización de emplazamientos y de desechos y la monitorización ambiental de las instalaciones de desechos radiactivos. Los radionucleidos de interés para la caracterización de emplazamientos —que la AMS puede cuantificar— son el carbono 14, el yodo 129, el cloro 36, el tecnecio 99, el criptón 81, el berilio 10 y el aluminio 26, mientras que para la caracterización de desechos los radionucleidos clave son el hidrógeno 3, el carbono 14, el cloro 36, el cesio 135, el yodo 129, el tecnecio 99, el uranio 236, el circonio 93 y el plutonio 240, 241 y 242. Los órganos reguladores tienen especial interés en la caracterización del hormigón utilizado en los reactores nucleares, lo que ha originado nuevos estudios de viabilidad de la AMS para una serie de nuevos radioisótopos como el calcio 41.

104. Los recientes avances tecnológicos de la técnica de la AMS han ampliado también el ámbito de sus aplicaciones, lo que ha permitido el estudio de una amplia gama de objetos del patrimonio cultural y natural, así como la detección de falsificaciones y del comercio ilícito de productos. Por ejemplo, los avances tecnológicos de vanguardia en materia de AMS han permitido datar capas de pintura, pigmentos, aglutinantes y lienzos de las obras de arte (figura D-3).



*Fig. D-3. Análisis de un cuadro posimpresionista. Izquierda: Fibras textiles de origen vegetal recogidas de la capa de pintura. Derecha: La determinación de la edad mediante la medición por AMS muestra que el origen de las fibras textiles es posterior al fallecimiento del supuesto artista, lo que demuestra que el cuadro era una falsificación. (Imágenes: Laboratorio de Medición de Carbono, Universidad de París-Saclay (Francia))*

105. La datación por carbono 14 utiliza el decaimiento de ese radionucleido para datar objetos que contienen carbono. El carbono 14, que es un isótopo radiactivo natural del carbono, se incorpora a todos los materiales que contienen carbono (orgánicos e inorgánicos) como parte del ciclo global del carbono. Con un período de semidesintegración de  $5700 \pm 30$  años, la detección del carbono 14 es un instrumento útil para determinar la edad de un espécimen formado en los últimos 55 000 años.

106. Hasta ahora, el criterio más concluyente en el ámbito de la detección de falsificaciones es la prueba científica de los anacronismos en los materiales, que se basa en la comparación de los materiales

presentes en una obra de arte con la información sobre su fecha más temprana de descubrimiento o producción. La datación por carbono 14 es un método atractivo, puesto que proporciona edades absolutas con un marco temporal definido para los materiales utilizados.

107. La espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica de análisis no destructiva, rápida, simultánea y multielemental para caracterizar muestras de diversa naturaleza y composición. La XRF es una opción rentable para muchos proyectos de investigación básica y aplicada. Utilizada en combinación con dispositivos para dirigir los rayos X, esta técnica permite la determinación no destructiva de la distribución elemental tanto en dos como en tres dimensiones. Las fuentes sincrotrónicas proporcionan rayos X de alta intensidad con una selección de energía y enfoque espacial ajustables a una variedad de técnicas de vanguardia para la distribución elemental, el análisis cerca de la superficie y el análisis de ultratrazas en varios campos de la ciencia de los materiales, como los nanomateriales, los biomateriales y los materiales energéticos (figura D-4).

108. Sobre la base de la información que puede consultarse en el recientemente creado Mapa Interactivo de Laboratorios de XRF del Organismo<sup>11</sup>, en la actualidad existen más de 1200 instalaciones de XRF en más de 100 países; sin embargo, en muchos casos, sus capacidades no son aún muy conocidas dentro de la comunidad de usuarios finales que podrían beneficiarse de esta potente técnica analítica.



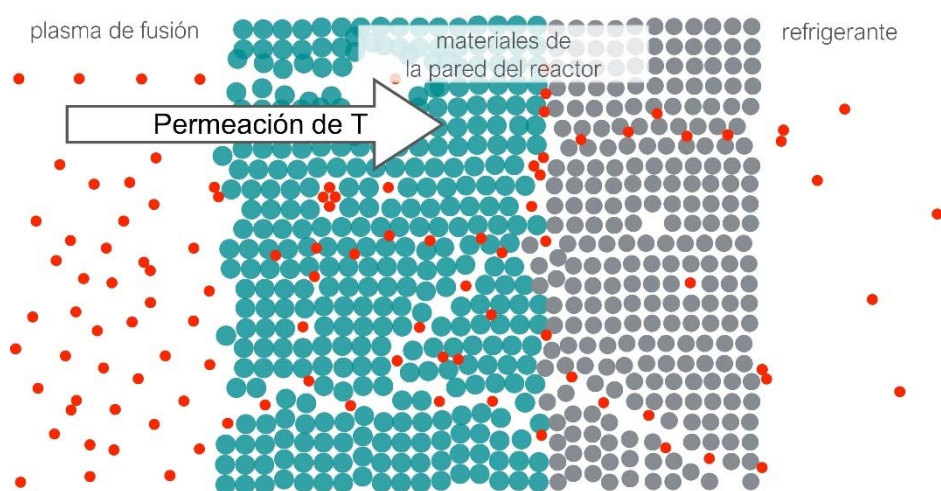
Fig. D-4. Principales ámbitos de aplicación de una instalación de XRF seleccionada.

<sup>11</sup> <https://nucleus-new.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Pages/World-Map-XRF-laboratories.aspx>

## E. Datos atómicos y nucleares

### Situación

109. El desarrollo de los reactores de fusión precisa de bases de datos numéricas de alta calidad para las interacciones sobre la escala atómica. Estos datos permiten realizar simulaciones computacionales del diseño. Las investigaciones actuales se centran en las simulaciones de los procesos de interacción del plasma y el material candidato para la pared del reactor de fusión y en la modelización atómica fundamental de las interacciones del hidrógeno con los materiales de la pared del reactor (figura E-1). La investigación experimental se ocupa principalmente de la estructura atómica fundamental de los materiales de fusión líquida y de los experimentos de fusión plasma-metal líquido que utilizan dispositivos de plasma lineal y dispositivos de fusión de tipo estelarator. La investigación teórica/computacional se realiza principalmente para la simulación de los efectos de la irradiación neutrónica y la permeación del hidrógeno.



*Fig. E-1. Representación esquemática del proceso de permeación del tritio en la pared de un reactor de fusión.*

### Tendencias

110. La rápida adopción de sistemas de inteligencia artificial/aprendizaje automático en diversos ámbitos es una tendencia clara que influirá en gran medida en la física nuclear y en la creación de bibliotecas de datos nucleares. Las posibles aplicaciones van desde la predicción de parámetros en códigos de modelos nucleares como TALYS, el análisis de tendencias en datos experimentales y la creación automatizada de la base de Datos Experimentales sobre Reacciones Nucleares, hasta la detección y localización de anomalías en centrales nucleares mediante flujos de datos modernizados y automatizados. Existen grandes posibilidades de que las técnicas modernas de análisis de datos mejoren las evaluaciones de datos nucleares para aplicaciones nucleares.

## F. Medio ambiente

111. La contaminación por plásticos es uno de los desafíos ambientales más acuciantes a nivel mundial y constituye una amenaza directa para el desarrollo sostenible. La iniciativa TECnología NUclear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics), puesta en marcha en 2021, se basa en las actividades del Organismo encaminadas a abordar la cuestión de la contaminación por plásticos a

través del reciclaje, a partir de tecnologías de la radiación, y de la monitorización marina, por medio de técnicas de rastreo isotópico.

## F.1 Tecnologías de la radiación para luchar contra la contaminación por plásticos

### Situación

112. Las tecnologías de la radiación poseen unas características singulares y ofrecen unas ventajas únicas para reducir los residuos de plásticos y polímeros al aumentar el reciclaje mecánico convencional de los plásticos y facilitar el reciclaje químico. La aplicación innovadora de haces de rayos gamma y de electrones puede contribuir a la clasificación eficaz de los residuos plásticos en los flujos de reciclaje. Esto mejora la calidad y el valor de los plásticos reciclados, transforma los residuos plásticos en otros productos de mayor valor y contribuye al reciclaje avanzado o químico del plástico. Estas aplicaciones también permiten ahorrar energía al descomponer los polímeros de plástico de los residuos para utilizarlos como materia prima química.

### Tendencias

113. En Filipinas se está desarrollando una aplicación que utiliza la radiación para inducir la polimerización por injerto, de modo que las fibras naturales y el plástico reciclado puedan compatibilizarse de manera eficaz. La polimerización inducida por la radiación fortalece la adhesión fibra-plástico lo que, a su vez, mejora las propiedades termomecánicas generales (figura F-1). En Filipinas hay una gran variedad de fibras naturales, como el abacá, el banano, la piña y el yute, conocidas por sus excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, dada su naturaleza hidrófila, intrínseca a la mayoría de las fibras lignocelulósicas, estas fibras naturales se emplean de manera limitada en los compuestos debido a su escasa adhesión interfacial. La polimerización por injerto inducida por la radiación permite vencer esta inmiscibilidad, haciendo que puedan mezclarse o se logre la homogeneidad.

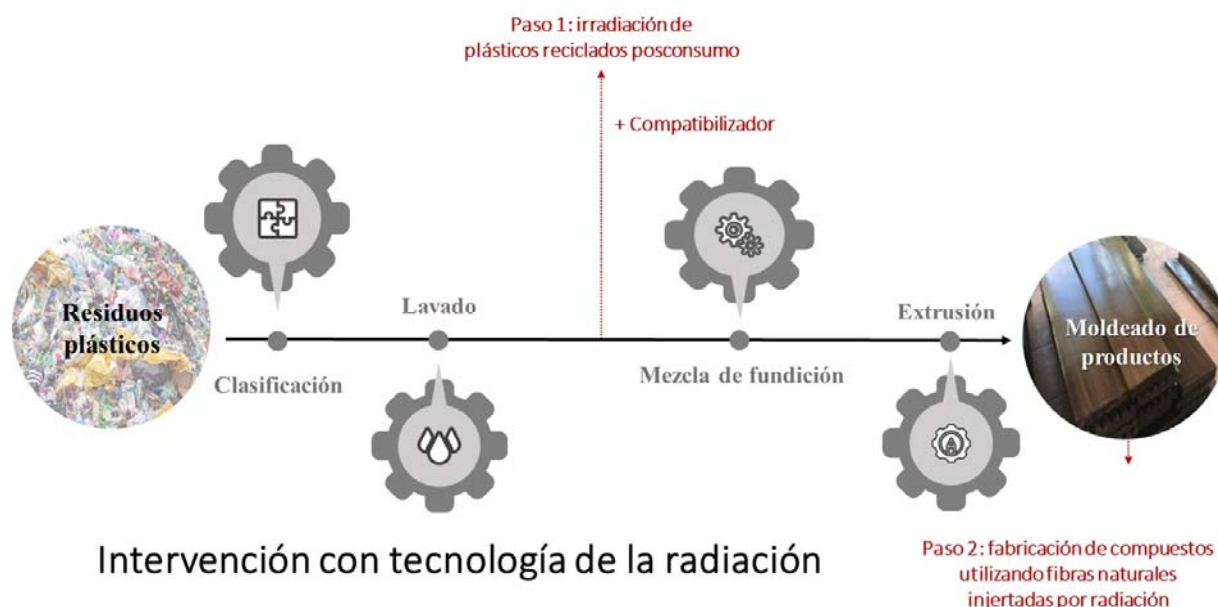


Fig. F-1. Esquema de la propuesta de fabricación de compuestos en Filipinas utilizando fibras naturales injertadas por radiación y plásticos reciclados posconsumo irradiados.  
(Imagen: Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares)



114. En Indonesia se está desarrollando otra aplicación que aprovecha la tecnología de la radiación para resolver los desafíos que plantean dos flujos de residuos. En este enfoque, los residuos plásticos se irradiarán para que puedan formar compuestos estables con fibras de biomasa de desechos a fin de generar materiales de construcción a partir de residuos de plástico y palma (figura#F-2). Las tecnologías de la radiación favorecen la descomposición de la biomasa, la compatibilización de los componentes y la reticulación en el producto resultante para adaptar sus propiedades.

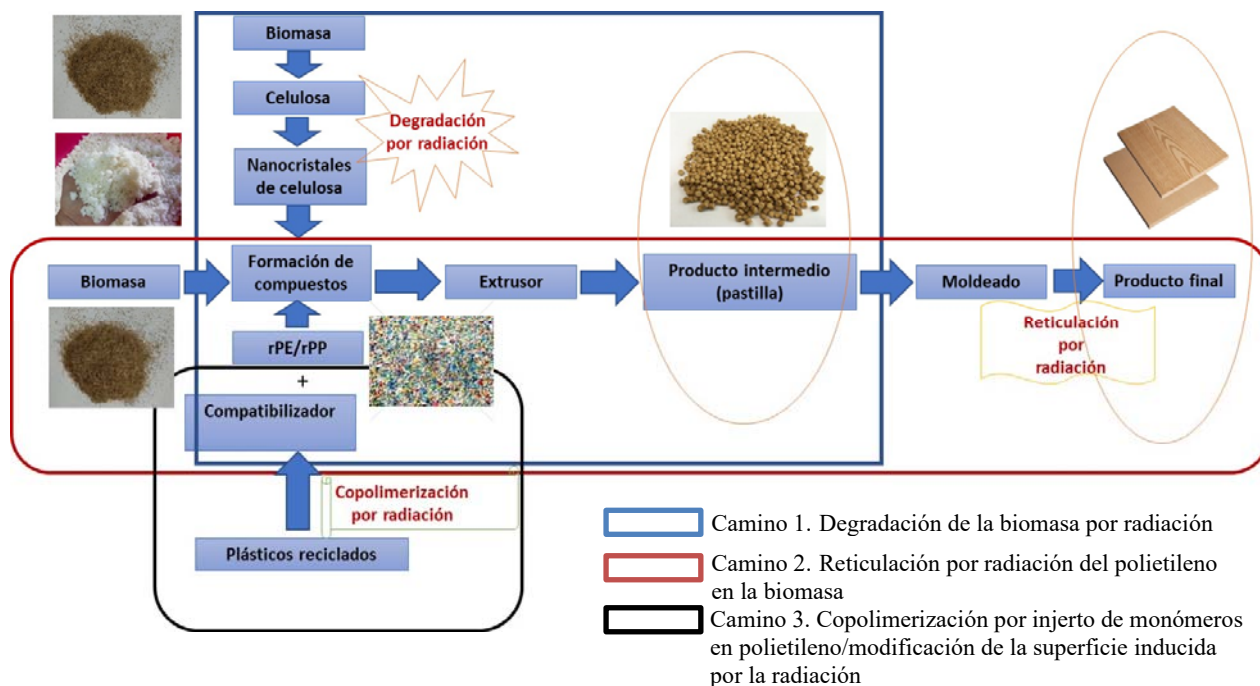


Fig. F-2. Esquema de las etapas de producción propuestas para el compuesto de madera y plástico reforzado con fibras naturales y plásticos reciclados (polietileno reciclado y polipropileno reciclado, rPE/rPP). (Imagen: Agencia Nacional de Energía Nuclear de Indonesia)

## F.2 Técnicas nucleares e isotópicas para luchar contra la contaminación por plásticos en el medio marino

### Situación

115. El océano es el depósito final de plásticos gestionados de manera inadecuada y no reciclados que proceden de fuentes terrestres. Si bien en el último decenio la comunidad científica mundial ha hecho grandes avances para comprender mejor la contaminación por plásticos en el medio marino y sus posibles efectos en diversos organismos acuáticos, aún se desconoce la cantidad de microplásticos que hay en el océano y las consecuencias de su presencia en él. Los efectos visibles y de gran repercusión de los macroplásticos (figura#F-3) en los organismos marinos están bien documentados, pero no está tan claro el posible daño causado por los microplásticos —partículas de menos de cinco milímetros de diámetro—. Dada la magnitud de este problema, la contaminación por plásticos se ha convertido en una preocupación ambiental a escala mundial y, por ende, ha captado la atención de los Gobiernos, la sociedad civil, los científicos y las organizaciones no gubernamentales.



*Fig. F-3. Macrólásticos capturados con una red de plancton en aguas costeras del Mediterráneo.*

116. Las iniciativas mundiales de la comunidad científica para luchar contra la contaminación por plásticos marinos se han beneficiado de manera considerable del uso de las tecnologías nucleares. En los últimos años se ha desarrollado una amplia gama de técnicas nucleares e isotópicas para determinar la composición, el tamaño y la cantidad de residuos plásticos en el medio marino. Estas se basan en técnicas de imagenología espectroscópica, como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y la microscopia Raman, para determinar el tipo de polímero y cuantificar el número de partículas de plástico de más de diez micrómetros presentes en una muestra natural. Como complemento a estas técnicas, la pirólisis-cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas y la desorción térmica acoplada a cromatografía de gases con detección por espectrometría de masas permiten simultáneamente identificar el polímero y analizar tanto la masa de cada tipo de polímero plástico (desde 500 micrómetros hasta una milésima de micrómetro) como los aditivos orgánicos asociados a la partícula de plástico en muestras ambientalmente complejas.

117. Todas estas técnicas nucleares e isotópicas pueden aplicarse en la monitorización mundial de los plásticos en el medio marino y, junto con la circulación oceánica y la modelización de la dispersión, contribuyen a rastrear las fuentes de los plásticos y su destino en el océano. Al combinar estas técnicas con las mediciones de los radionucleidos ambientales (berilio 7, plomo 210, cesio 137 y plutonio 239/240) presentes en los sedimentos y la fluorescencia de rayos X, los científicos pueden establecer la geocronología de la capa del sedimento, lo que les permite reconstruir las tendencias históricas de la contaminación del mar por plásticos y comprender mejor el envejecimiento de los microplásticos tras la sedimentación.

118. Las tecnologías nucleares también han contribuido sustancialmente a comprender la transferencia de microplásticos a los organismos marinos y sus efectos en ellos. Algunas partículas microplásticas son tan pequeñas que pueden ser ingeridas por estos organismos y penetrar en sus órganos, afectando a su supervivencia. Además, los microplásticos pueden ser vectores de otros contaminantes. Estudios recientes han puesto de manifiesto la utilidad de las técnicas nucleares de laboratorio para cuantificar el movimiento y los efectos biológicos de los microplásticos y sus contaminantes asociados, así como para detectar la tensión de los organismos marinos causada por los microplásticos. Además de utilizarse para evaluar

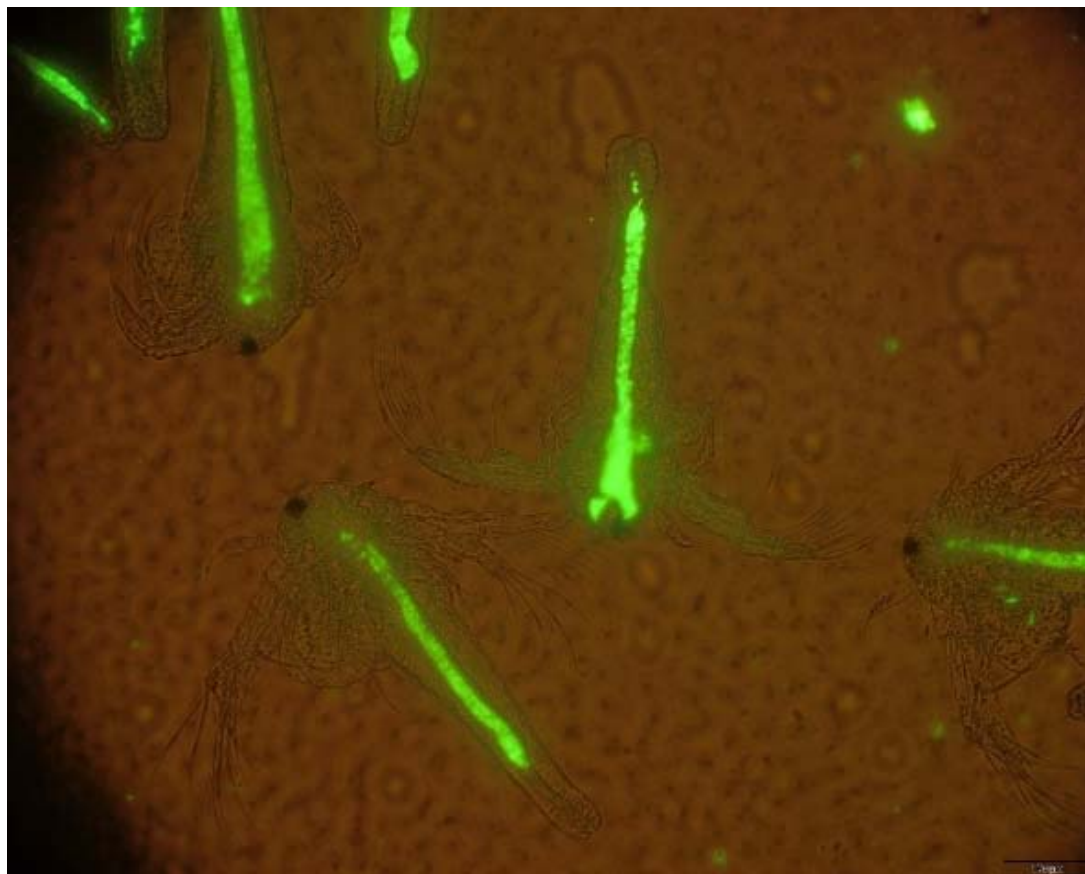
la biodistribución, técnicas de imagenología nuclear como la autorradiografía, la tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computarizada por emisión de fotón único también pueden servir para medir las repercusiones morfológicas de los plásticos tanto a nivel de los tejidos como del organismo.

### **Tendencias**

119. Para colmar las lagunas en cuanto a los conocimientos en materia de monitorización y caracterización de la contaminación del mar por plásticos, especialmente en lo que se refiere a las partículas de menor tamaño, es preciso emprender una serie de actividades de investigación y desarrollo. Es imprescindible comprender mejor los efectos físicos de las propias partículas de plástico, incluidas su acumulación, traslocación y transferencia trófica en el medio marino.

120. Para estudiar la acumulación de partículas de plástico en la biota, la mayoría de los estudios realizan mediciones de todo el cuerpo o de tejidos específicos mediante la digestión de los tejidos y la separación de las partículas por filtración, o utilizan el seccionamiento de tejidos y la evaluación histológica, tras lo cual se lleva a cabo, en ambos casos, una confirmación visual y/o espectroscópica. Las limitaciones encontradas al usar las técnicas tradicionales podrían superarse empleando metodologías nucleares para crear partículas plásticas radiactivas, o radioplásticos, que puedan rastrearse con radiotrazadores. Aunque recientemente se han utilizado radioplásticos con polímeros de carbono 14 (emisores beta), en el futuro podrían usarse radioplásticos emisores gamma a fin de evaluar la retención de microplásticos una vez ingeridos y su transferencia a lo largo de una cadena alimentaria. El Organismo y sus colaboradores están desarrollando otras tecnologías nucleares que utilizan microplásticos marcados con isótopos estables, lo que podría propiciar avances decisivos para comprender la transferencia de los microplásticos y sus efectos en los organismos marinos.

121. Los investigadores también han empezado a estudiar la fragmentación de los plásticos a escalas más pequeñas, lo que se conoce como nanoplásticos. Actualmente no es posible cuantificar los nanoplásticos en el medio ambiente. Si bien existen métodos analíticos (fluorimetría y pirólisis-cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas) para estudiar los nanoplásticos en laboratorio (figura#-4), estas técnicas no necesariamente sirven para evaluar las muestras ambientales. Las técnicas nucleares e isotópicas serán importantes en el futuro para abordar y monitorizar la fragmentación de los microplásticos y la cantidad de nanoplásticos. El problema de separar y caracterizar los residuos plásticos según su tamaño, por ejemplo, los microplásticos y los nanoplásticos, es una cuestión que preocupa cada vez más, ya que la variedad de tamaños nanométricos podría plantear interacciones más complejas y peligrosas con los sistemas biológicos. El fraccionamiento por flujo de campo acompañado de la pirólisis-cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas es una metodología prometedora para determinar los posibles efectos de los nanoplásticos en el medio ambiente. Otras tecnologías emergentes para cuantificar las partículas de plástico en el medio marino son la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción, que permite obtener información sobre la distribución del tamaño de las partículas y la concentración en masa de los nanoplásticos y los microplásticos empleando carbono 13 para su detección, y la tomografía computarizada en 3D, una técnica que se utiliza habitualmente en la investigación en el ámbito de la ingeniería.



*Fig. F-4. Ingestión de nanoplásticos por los nauplios del camarón de salina (fase inicial de la vida de la Artemia salinas) visible mediante fluorescencia.*

122. Es necesario tener en cuenta y abordar los posibles riesgos y peligros de los nanoplásticos en el medio ambiente, y las técnicas nucleares de laboratorio actuales ya están en condiciones de hacerlo. Sin embargo, hasta ahora el destino y el efecto de los nanoplásticos en el medio ambiente solo se ha analizado de forma somera.

123. Los avances previstos en las técnicas nucleares e isotópicas para monitorizar la contaminación marina y evaluar mejor sus efectos en los organismos marinos deben ir acompañados de dos avances clave: el aumento imprescindible de las capacidades a escala mundial para llevar a cabo actividades de monitorización y evaluación de los datos sobre los plásticos marinos a fin de que esas capacidades alcancen unos niveles similares; y la reducción necesaria de las disparidades en la validación de los métodos de monitorización mediante actividades de comparación, armonización y normalización que permitan garantizar unos resultados fiables. Es necesario contar con materiales de referencia, actualmente inexistentes, que pongan de manifiesto la variedad de tipos de polímeros, la amplia gama de tamaños, las diferentes formas y el estado de envejecimiento de las partículas microplásticas que se encuentran en el océano.

124. Las técnicas nucleares e isotópicas desempeñarán un papel crucial en la lucha contra la contaminación del mar por plásticos de forma sostenible y en la mejora de la toma de decisiones informadas y la gestión de nuestro océano basada en criterios científicos.



## G. Alimentación y agricultura

### G.1 Marcación isotópica innovadora para evaluar y mitigar la persistencia y el transporte de antibióticos y sus repercusiones en la resistencia a los antimicrobianos

#### Situación

125. Las sustancias antimicrobianas, como antibióticos, antivíricos, fungicidas y antiparasitarios, se utilizan para prevenir y tratar infecciones que afectan a los seres humanos, animales y plantas. Si bien salvan vidas, su uso exagerado o equivocado es el principal motivo por el que se desarrollan agentes patógenos resistentes a los medicamentos. La Organización Mundial de la Salud ha declarado la resistencia a los antimicrobianos una de las diez principales amenazas para la salud pública mundial. Actualmente se cobra 700 000 muertes al año y se prevé que para 2050 alcance los 10 millones de muertes anuales.

126. El uso de antibióticos está muy extendido en la producción pecuaria y avícola, con el objetivo de controlar las enfermedades y promover el crecimiento. Entre el 10 % y el 90 % de los fármacos administrados no son totalmente absorbidos/metabolizados por el animal y se excretan en forma de orina y heces. Ya sea directamente como estiércol (figura G-1) o indirectamente como lodos de aguas residuales, ambos pueden emplearse luego como fertilizante o como enmiendas del suelo en terrenos agrícolas, donde liberan al suelo tanto las bacterias como las sustancias antimicrobianas y sus metabolitos.



*Fig. G-1. Las enmiendas con estiércol para mejorar la fertilidad del suelo liberan al terreno tanto antimicrobianos como sus metabolitos (genes antimicrobianos). (Fotografía: Programa para la Bahía de Chesapeake)*

127. La resistencia a los antimicrobianos surge a medida que las bacterias, los virus, los hongos y los parásitos cambian con el tiempo. Todos ellos mutan, se adaptan y ya no responden a las sustancias antimicrobianas, y esto dificulta el tratamiento de las infecciones. Se están encontrando organismos resistentes a los antimicrobianos en seres humanos, animales, alimentos, plantas y el medio ambiente (especialmente en el agua y el suelo). Estos organismos tienen una ventaja evolutiva y pueden



desencadenar el desarrollo de un microbioma, es decir, una población bacteriana, que porta genes resistentes a los antimicrobianos. Si bien la resistencia a los antimicrobianos se ha estudiado ampliamente en la salud humana y animal, su impacto en el suelo y el agua todavía se desconoce.

128. La transferencia de sustancias antimicrobianas a través del medio ambiente puede dar origen a la presencia de residuos antimicrobianos en plantas, animales y alimentos, y en la cadena alimentaria hay muchos nichos en los que abundan las poblaciones microbianas y en los que puede surgir una resistencia a los antimicrobianos. Así pues, tanto los alimentos como el medio ambiente desempeñan un papel importante en las complejas vías por las que la resistencia a los antimicrobianos se transmite a los seres humanos. Evaluar el origen y el destino de la resistencia a los antimicrobianos y desarrollar opciones de gestión ayudará a reducir el número de muertes conexas. Esto está en consonancia con el enfoque “Una salud”, en el que se reconoce que la salud de los seres humanos, los animales domésticos y salvajes, las plantas y el medio ambiente en general (incluidos los ecosistemas) están estrechamente vinculados entre sí y son interdependientes.

129. Los métodos químicos convencionales actuales pueden utilizarse para evaluar la propagación de sustancias antimicrobianas en el medio ambiente y en los alimentos, y para estudiar la resistencia en las bacterias, pero no pueden explicar el destino, la dinámica y la persistencia de las sustancias antimicrobianas y la resistencia a los antimicrobianos en los sistemas agrícolas. Pueden medir inventarios de concentraciones de antimicrobianos como una instantánea en el tiempo, pero no pueden medir incógnitas como los metabolitos. Las sustancias antimicrobianas se introducen continuamente en los terrenos agrícolas. Sin embargo, se presentan en concentraciones estables como resultado del uso repetido. En un contexto así es difícil detectar cómo se degradan estas sustancias químicas con el tiempo y con los análisis convencionales es imposible evaluar la velocidad con la que las sustancias antimicrobianas se propagan en el medio ambiente tras su aplicación, la rapidez con la que se transforma/metaboliza el insumo recién aplicado y qué metabolitos se forman, cómo contribuyen los metabolitos antimicrobianos al desarrollo de poblaciones bacterianas resistentes a los antimicrobianos, y cuál es la importancia de este insumo en relación con los insumos anteriores y posteriores de la misma sustancia antimicrobiana.

### **Tendencias**

130. El análisis de isótopos estables por compuesto y las tecnologías de sondeo son potentes herramientas para evaluar sustancias antimicrobianas. Pueden utilizarse para medir las proporciones de isótopos estables naturales (por ejemplo, carbono 13 y nitrógeno 15) en muestras ambientales mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas de relaciones isotópicas y mediante cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas de relaciones isotópicas. Asimismo, pueden orientar a los responsables de la toma de decisiones en materia de rehabilitación ambiental sobre las posibles fuentes de contaminantes y el grado de degradación. Las técnicas de sondeo con isótopos estables se utilizan para determinar si se puede producir o se produce biodegradación de un determinado contaminante en un lugar contaminado. Todos los enfoques de sondeo con isótopos estables utilizan contaminantes marcados isotópicamente (carbono 13 con nitrógeno 15 y oxígeno 18) para detectar y cuantificar los procesos de biodegradación y caracterizar los microorganismos responsables de estas actividades. A fin de comprender la dinámica de los antimicrobianos y la resistencia a ellos en la cadena alimentaria, se propone un enfoque integrado que emplee tecnología isotópica y secuenciación genómica. Esto podría ayudar a investigar la dinámica y la excreción de los antimicrobianos por parte de los animales y su destino en el medio ambiente (en particular en el suelo y el agua), junto con la evolución y la propagación de genes resistentes a los antimicrobianos.

131. Con objeto de aplicar estas tecnologías para rastrear antimicrobianos en los sistemas agrícolas, el Organismo ha puesto en marcha un proyecto coordinado de investigación sobre técnicas isotópicas para evaluar el destino de los antimicrobianos y las repercusiones sobre la resistencia a los antimicrobianos

en los sistemas agrícolas. La técnica de análisis de isótopos estables por compuesto se ha desarrollado para rastrear el origen y el destino de los pesticidas/antimicrobianos veterinarios en las cuencas agrícolas. Esa tecnología se utiliza para hacer un seguimiento del origen, la dinámica y la propagación de los antibióticos tras su aplicación en la agricultura y para evaluar el posible impacto en el medio ambiente. El primer paso es armonizar las técnicas de diagnóstico y de seguimiento de los antibióticos sintéticos marcados que se aplican al estiércol. Por el momento, las cantidades insuficientes de antibióticos sintéticos comerciales con marcación obstaculizan la puesta a prueba de esta metodología sobre el terreno.

132. Por conducto del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, el Organismo colabora con la Universidad Técnica de Múnich a fin de sintetizar sulfametoxazol y tetraciclina marcados (antibióticos de uso común en medicina humana y veterinaria) mediante síntesis orgánica, con objeto de utilizarlos en un estudio de campo en colaboración con asociados de Australia, el Brasil, China, Sudáfrica y Viet#Nam. El objetivo es establecer directrices/protocolos analíticos para rastrear el flujo de antibióticos desde los medicamentos destinados a consumo humano o del ganado a través de la excreción, el estiércol, las superficies contaminadas y las aguas subterráneas utilizadas para el riego, y la escorrentía agrícola en el medio ambiente. El Laboratorio de Gestión de Suelos y Aguas y Nutrición de los Cultivos del Organismo, en Seibersdorf, impartirá capacitación práctica sobre la aplicación de técnicas isotópicas para hacer un seguimiento de los antimicrobianos en el medio ambiente. Asimismo, proporcionará orientaciones relativas a la aplicación de esta metodología para que los países en desarrollo elaboren estrategias destinadas a mitigar la propagación de los antibióticos en el medio ambiente. El Laboratorio de Protección de los Alimentos y del Medio Ambiente del Organismo, en Seibersdorf, prestará asistencia estudiando los antimicrobianos en los alimentos mediante los métodos de análisis por dilución isotópica y de análisis de isótopos estables por compuesto.

133. Se pueden utilizar avances recientes en técnicas moleculares/biológicas, como la metagenómica de escopeta, para detectar y cuantificar los genes resistentes a los antimicrobianos. Los análisis de otros elementos genéticos o genes, como la integrasa de los integrones de clase, pueden a menudo proporcionar un buen sustituto para la presencia en general de contaminación antropogénica, incluidas bacterias resistentes en entornos contaminados. Con sus plataformas de secuenciación genómica, el Laboratorio de Producción Pecuaria y Salud Animal del Organismo, en Seibersdorf, contribuirá al proyecto dotando de tecnologías moleculares e impartiendo capacitación práctica por lo que respecta a análisis de laboratorio para identificar las cepas resistentes a los antimicrobianos, y rastreando los genes asociados a la resistencia a los antimicrobianos. Se prevé que la integración de técnicas isotópicas, como el análisis de isótopos estables por compuesto, y de técnicas moleculares más avanzadas permitirá comprender mejor el destino y la dinámica de los antibióticos en el estiércol aplicado y sus repercusiones sobre la resistencia a los antibióticos en el medio ambiente.

## **G.2 Variación genética inducida por el espacio, fitomejoramiento y astrobiología para luchar contra el cambio climático**

### **Situación**

134. Con frecuencia se recurre al espacio con fines de investigación astrobiológica. Las condiciones concretas que imperan en la órbita terrestre y fuera de ella, en particular el entorno de radiación y la microgravedad, han motivado una serie de experimentos biológicos desde los inicios de la exploración espacial a finales de la década de 1950. Muchos experimentos se han centrado en el efecto de la microgravedad sobre el crecimiento de las plantas, por ejemplo, en la Estación Espacial Internacional (EEI), o en entornos espaciales simulados en la Tierra, como el Laboratorio de Ciencias de la Vida Espacial de la NASA.

135. Estos experimentos se han centrado en cuestiones de biología fundamental con objeto de comprender la capacidad de cultivar plantas de forma productiva en las condiciones de microgravedad propias de las misiones espaciales. Los resultados han demostrado que la alteración de la gravedad repercute en la proliferación y el crecimiento de las células, la expresión genética y la epigenética. En experimentos recientes se estudió la variación genética inducida por el espacio para ver si las nuevas especies de plantas soportan condiciones adversas en la Tierra, como las causadas por el cambio climático. En enero de 2021 regresó a la Tierra una carga útil de 320 esquejes de vid de investigadores franceses, tras haber permanecido en el interior de la EEI durante diez meses. En este experimento, los investigadores están estudiando principalmente cómo repercute la microgravedad del medio interno de la EEI en el genoma de la vid y su rendimiento fisiológico. Con un fin de investigación similar, en 2020 la empresa de botánica Front Range Biosciences envió a la EEI cultivos de tejidos de cáñamo y tabaco.

136. Aunque la mayoría de los experimentos de astrobiología realizados en el mundo hasta la fecha se han centrado en los efectos de la microgravedad en la biología de las plantas, también se ha utilizado el entorno de radiación del espacio ultraterrestre para inducir variación genética en semillas de cultivos, a fin de mejorarlos mediante el proceso de selección por mutación. En los últimos 15 años, China ha dado a conocer más de 30 nuevas variedades mutantes de cultivos, desarrolladas mediante mutagénesis por exposición al espacio utilizando satélites en órbita, globos estratosféricos o por radiación cósmica simulada en la Tierra. Estos proyectos han utilizado una combinación del entorno de radiación y la microgravedad propios del espacio ultraterrestre para inducir variación genética. En el espacio ultraterrestre las semillas estaban expuestas al medio espacial externo y desprotegidas frente a la radiación, a diferencia de en el medio interno de la EEI.

137. Los experimentos astrobiológicos que investigan los efectos del espacio en las semillas de las plantas siguen siendo muy limitados, y se centran sobre todo en la capacidad de supervivencia de las semillas junto con varios microorganismos. La primera exposición de microorganismos a la radiación espacial se realizó en cohetes de sondeo en 1965, a 150 km de la Tierra, luego con las misiones Gemini 9 y 12 en 1966, a 300 km, y, finalmente, durante el regreso de la misión Apolo 16 desde la Luna en 1974. Desde entonces se han realizado una serie de experimentos biológicos, principalmente para demostrar que los organismos vivos pueden sobrevivir en las condiciones sumamente hostiles del espacio, que se centraron principalmente en bacterias, algas, líquenes y, hasta cierto punto, en semillas de plantas. Estos experimentos se llevaron a cabo en plataformas específicas como la Instalación de Exposición de Larga Duración (LDEF), EURECA (vehículo europeo recuperable de transporte), la estación espacial Mir, el programa de investigación BioPAN (metodología bioinformática para el análisis de vías), las cargas útiles acopladas externamente para la primera fase de utilización (EXPOSE) en la EEI, el experimento TANPOPO en el módulo experimental japonés (JEM) de la EEI, el nanosatélite O/OREOS (de exposición de organismos y de materia orgánica al estrés orbital) y su carga útil SESLO (destinada a estudiar la supervivencia de los organismos vivos en un entorno espacial). La reciente disponibilidad de cargas útiles comerciales facilita actualmente los experimentos astrobiológicos en la EEI con cargas útiles internas o externas de material vegetal.

## **Tendencias**

138. En la literatura publicada figura escasa información científica sobre los efectos mutagénicos del entorno espacial en el plano genómico y fisiológico de las plantas cultivadas. Científicos chinos han informado de que en las semillas de trigo enviadas al espacio en el satélite recuperable Shijian-8, la radiación espacial y la microgravedad indujeron las mutaciones más habituales. Esto indica un efecto sinérgico entre los rayos cósmicos y la microgravedad. El efecto único de la microgravedad, en cambio, fue mucho menor que el de los rayos cósmicos<sup>12</sup>. Otros han revelado rutas y genes presentes en los

---

<sup>12</sup> Guo, H., et al., Mutagenic effects of different factors in spaceflight environment of Shijian-8 satellite of wheat, *Acta Agronomica Sinica* Vol. 36 No.5, 2010.

mutantes con tolerancia a la salinidad generados a partir de mutagénesis espacial<sup>13</sup>. Asimismo, en el marco de la misión espacial Chang'e-4 se han enviado semillas de cultivos al primer módulo de la nueva estación espacial china y a la superficie lunar.



Fig. G-2. Plataforma externa Nanoracks en la EEI. (Fotografía: Nanoracks)

139. En la actualidad existe un creciente interés por comprender el efecto del entorno espacial en la producción de mutaciones en los genomas de las plantas y en la modificación de su fisiología, lo cual mejora la capacidad de estas para soportar condiciones de crecimiento adversas en la Tierra, como las que ocasiona el cambio climático. Hoy en día, las cargas útiles de semillas o material vegetal enviadas a la EEI pueden estar gestionadas por al menos dos entidades comerciales que buscan subsanar las carencias en la facilitación o la realización de investigaciones sobre los efectos de la radiación cósmica y la microgravedad en la modificación de la resistencia de las plantas a condiciones de crecimiento adversas. Se prevén rápidos avances en esta esfera dado el continuo interés por explorar la biología de las plantas en el espacio, tanto para alimentar a los astronautas como para utilizar las valiosas mutaciones derivadas de la exposición al espacio a fin de obtener variedades de cultivos resilientes.

140. En 2022 el Organismo, a través de su Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, se adentrará por primera vez en el ámbito de la astrobiología y el fitomejoramiento espacial, con un experimento en el que está previsto colocar semillas de dos especies vegetales<sup>14</sup> tanto dentro como fuera de la EEI durante un período de 3 a 7 meses en las cargas útiles internas y externas, respectivamente. Para la carga útil externa se utilizará la Plataforma Externa Nanoracks,

---

<sup>13</sup> Xiong, H., et al., RNAseq analysis reveals pathways and candidate genes associated with salinity tolerance in a spaceflight-induced wheat mutant, *Scientific Reports* 7, 2731, 2017.

<sup>14</sup> *Arabidopsis thaliana*, una pequeña planta con flores que se utiliza habitualmente como organismo modelo en biología vegetal, y *Sorghum bicolor*, conocido simplemente como sorgo, que se cultiva por su grano, empleado para la alimentación humana, el pienso y la producción de etanol.

acoplada de forma semipermanente a la Instalación Expuesta del JEM (figura#G-2). La carga útil externa se instalará en el volumen presurizado de la EEI antes de ser alojada en el exterior. Esta será la primera exploración sistemática en el mundo destinada a comprender y utilizar los efectos de la radiación cósmica y la microgravedad en la variación genética inducida, para su posible uso en el desarrollo de cultivos que puedan soportar condiciones de crecimiento adversas en la Tierra, como las impuestas por el cambio climático.

## **H. Salud humana**

### **H.1 Teranóstica: una hoja de ruta para la atención personalizada del cáncer**

#### **Situación**

141. Todo cáncer está compuesto por distintos tipos de células. Para una atención médica óptima, la selección del tratamiento debería basarse en la identificación de los subtipos de cáncer que pueden caracterizarse fácilmente gracias a la medicina nuclear, lo que permite un enfoque de tratamiento personalizado.

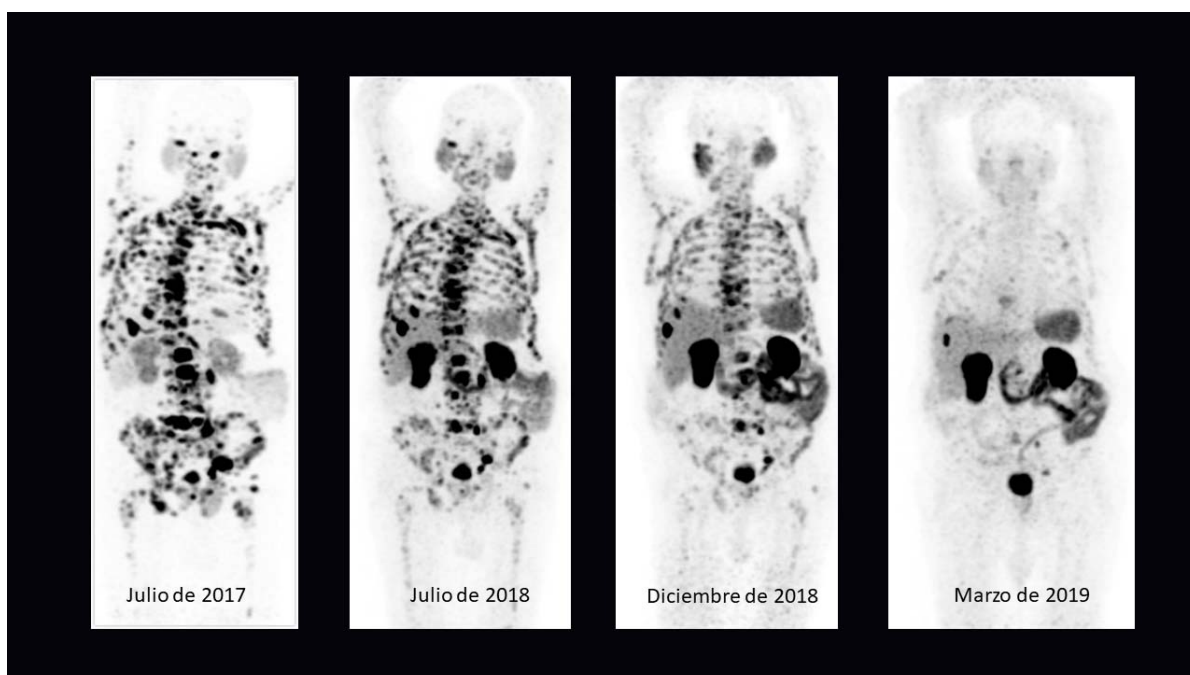
142. En los últimos años la medicina nuclear ha experimentado un impresionante crecimiento con, entre otros, el desarrollo de PET (tomografía por emisión de positrones), en especial la que utiliza la fluorodesoxiglucosa (marcada con flúor 18), y nuevos enfoques en materia de terapia dirigida con radionucleidos. Estos avances allanan el camino hacia un manejo personalizado del cáncer. Los radiofármacos dirigidos a biomarcadores específicos son potentes herramientas para evaluar la ubicación y la propagación de la enfermedad, establecer el valor pronóstico, evaluar la respuesta al tratamiento y contribuir a la planificación del tratamiento o las biopsias guiadas. Además, una vez marcados con emisores beta o alfa, los radiofármacos dirigidos a marcadores moleculares pertinentes expresados por diferentes tumores sólidos y hematológicos pueden utilizarse para terapias dirigidas con radionucleidos.

143. La medicina nuclear moderna desempeña un papel fundamental para lograr una medicina “personalizada” o “de precisión”, ya que permite elegir un tratamiento específico que se adecue al estado de cada paciente o a su predisposición a padecer una enfermedad. Puede, por lo tanto, abordar la evaluación del riesgo, el diagnóstico, el seguimiento del tratamiento y la terapia con radionucleidos teniendo en cuenta las características distintivas del individuo, con el objetivo de mejorar la calidad de vida y la salud pública. Esto contribuye directamente a la consecución del Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 de las Naciones Unidas sobre salud y bienestar.

144. La teranóstica basada en isótopos se refiere a la combinación de diagnóstico y terapia, y permite a los profesionales médicos centrarse en las necesidades concretas de cada paciente. En este enfoque se utilizan con fines diagnósticos o terapéuticos moléculas similares que contienen isótopos radiactivos distintos. Mientras un radioisótopo se utiliza para determinar con gran precisión la ubicación y la propagación del cáncer, así como el tipo específico de célula cancerosa, otro emite radiación para matar las células cancerosas. En comparación con los tratamientos de radiación convencionales, orientados de manera más amplia a la enfermedad y a su ubicación general, el enfoque teranóstico permite lograr una mayor especificidad al dirigirse al tumor con “balas” radiactivas al tiempo que se preservan los tejidos sanos circundantes, lo que aumenta tanto la eficacia como la seguridad del tratamiento (figura H-1).

145. El apoyo que presta el Organismo a los Estados Miembros para que, en el contexto de prácticas clínicas seguras y adecuadas, establezcan instalaciones y reciban capacitación sobre teranóstica contribuye a la transición hacia la medicina personalizada.





*Fig. H-1. Evolución mediante la teranóstica de un paciente de 82 años con cáncer de próstata diseminado a los ganglios linfáticos y los huesos. De izquierda a derecha: del estado al comienzo de la teranóstica hasta la remisión casi completa de la enfermedad. (Fotografías: Centro Médico de la Universidad Americana de Beirut)*

## **Tendencias**

146. En los últimos decenios, las terapias y la medicina de precisión (en particular, el diagnóstico por la imagen dirigido) han avanzado notablemente. Esto obedece en parte al desarrollo de nuevas moléculas y tecnologías, que impulsaron un rápido crecimiento del número de aplicaciones clínicas teranósticas y de su uso a nivel mundial.

147. Las aplicaciones clínicas se están incrementando a un ritmo acelerado. En la actualidad, las aplicaciones más destacadas están destinadas a la atención a pacientes con tumores neuroendocrinos, linfomas y cánceres de próstata, mama, pulmón y tiroides.

148. El futuro de la teranóstica se basa en el desarrollo de nuevas moléculas diseñadas para dirigirse a células tumorales específicas, lo que permitirá tratar algunos cánceres avanzados al tiempo que se reducen los efectos secundarios. En esta esfera en rápido crecimiento, surge la necesidad de ampliar la cooperación internacional y la normalización, por lo que respecta a la capacitación de expertos médicos y científicos y la creación de infraestructura médica especializada.

## **H.2 Avances en la ciencia de la nutrición: ayudar a los países a emplear datos para hacer frente a la epidemia de obesidad**

### **Situación**

149. La nutrición es un aspecto fundamental que deben considerar todos los países con miras a alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 sobre buena salud y bienestar. Mientras que la desnutrición se mantiene en niveles alarmantemente elevados, la obesidad va en aumento. Según el *2021 Global Nutrition Report*<sup>15</sup>, el sobrepeso y la obesidad en adultos están al alza en casi todos los países y regiones. Tienen sobrepeso 2200 millones de personas, de las cuales 772 millones padecen obesidad. En 2020 se estimó que en torno al 6 % de los niños menores de 5 años padecían sobrepeso, de los cuales casi la

<sup>15</sup> <https://globalnutritionreport.org/reports/2021-global-nutrition-report/>

mitad vivían en Asia y más de una cuarta parte, en África. La obesidad es un importante factor de riesgo para la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, el cáncer, los trastornos del aparato locomotor y la mortalidad en general. Las enfermedades relacionadas con la obesidad han alcanzado proporciones epidémicas en todo el mundo, y al menos 2,8 millones de personas mueren cada año como consecuencia del sobrepeso o la obesidad. Se calcula que, de aquí a 2025, las enfermedades relacionadas con la obesidad acarrearán anualmente en todo el mundo costos por valor de 1,2 billones de dólares. Con objeto de hacer frente a la epidemia de obesidad, la población y los encargados nacionales e internacionales de formular políticas deben unirse para apoyar intervenciones, medidas y políticas nutricionales eficaces. En este contexto, los datos sobre el gasto calórico arrojados por la técnica de isótopos estables del agua doblemente marcada son cruciales y aportarán a los encargados de formular políticas la información empírica necesaria para diseñar políticas nutricionales y sanitarias más eficaces que permitan combatir la creciente epidemia de obesidad en todo el mundo.

150. El gasto calórico total medido por agua doblemente marcada se refiere a la cantidad de energía que gasta una persona. Es importante para determinar las necesidades de ingesta energética. Los datos de gasto calórico total guían el desarrollo y la evaluación de las intervenciones en materia de nutrición y actividad física, además de ser el criterio de referencia para validar las técnicas simples de ingesta energética. El Organismo respalda la aplicación de la técnica del agua doblemente marcada, ya que es la única que permite evaluar el gasto calórico total en condiciones en vida libre sin interrumpir las actividades cotidianas, lo que la hace ideal para su uso en situaciones sobre el terreno.

151. El método del agua doblemente marcada se sirve de dos trazadores isotópicos estables, el deuterio y el oxígeno 18, para medir el gasto calórico de una persona. Una persona bebe una dosis de agua que contiene los dos isótopos no radiactivos y la dosis se mezcla con el agua del cuerpo. Los isótopos se eliminan a través de la orina, el sudor y el aliento. Se toman muestras de orina antes de administrar la dosis y entre 7 y 14 días después de su administración. El deuterio solo se elimina en el agua del cuerpo, mientras que el oxígeno 18 se elimina con mayor rapidez en el agua y el dióxido de carbono. La diferencia de la velocidad de eliminación del deuterio y del oxígeno 18 es una medida del índice de producción de dióxido de carbono, a partir de la cual se puede calcular el gasto calórico.

152. Aunque el método es no invasivo, seguro y fácil de ejecutar sobre el terreno, puede ser costoso aplicarlo a grandes poblaciones debido al precio de los isótopos y del equipo analítico necesario. Por ello, los estudios que utilizan agua doblemente marcada han tendido a ser pequeños. Ahora bien, si se ponen en común datos de numerosos estudios se pueden obtener respuestas a determinadas preguntas que los estudios individuales no son capaces de responder, como la manera en que el cambio climático afectará a las necesidades energéticas de diversas poblaciones. Con objeto de facilitar la puesta en común de los datos mundiales sobre el agua doblemente marcada y responder así a preguntas importantes, en diciembre de 2018 el Organismo puso en marcha una base de datos que contiene mediciones del gasto calórico humano correspondientes a los tres últimos decenios. En noviembre de 2021, la base de datos reunía datos de más de 7600 personas de 32 países, con edades comprendidas entre los 8 días y los 95 años. Casi el 65 % de los participantes en el estudio son mujeres y la mayoría de los datos proceden de países de ingresos altos.

## **Tendencias**

153. La base de datos del Organismo en materia de agua doblemente marcada puede considerarse un punto de inflexión en la lucha contra la obesidad. Los nuevos hallazgos publicados en 2021 basados en el análisis de sus datos demuestran la importancia decisiva de las técnicas de isótopos estables para nuestra comprensión de la salud humana y, en particular, de la crisis de obesidad.

154. Un artículo publicado en *Science*<sup>16</sup> cambió por completo la manera que teníamos de entender el metabolismo (figura H-2). A partir de los datos de la base de datos del Organismo en materia de agua doblemente marcada se examinó la evolución del gasto calórico diario a lo largo de la vida humana y se demostró que, desde el nacimiento hasta la novena década de vida, el metabolismo tiene en realidad cuatro fases diferentes. Las etapas destacadas de la vida, como la pubertad, el embarazo y la menopausia, así como el género y el envejecimiento propio de la mediana edad, no afectan al metabolismo tanto como se creía. Estos hallazgos ayudarán a los científicos a comprender mejor cuestiones importantes sobre la salud metabólica y a saber cómo ayudar a las personas a llevar una vida más sana en cada etapa de la vida.

155. Otro artículo publicado en *Current Biology*<sup>17</sup> se centra en el impacto de la actividad física en el balance de energía y muestra que una mayor actividad física no conduce a un gasto calórico total tan alto como se pensaba. Esto se debe al principio de la compensación, es decir, al hacer más ejercicio se reduce el metabolismo basal. Además, las personas con adiposidad, u obesidad severa, podrían tener más dificultades para quemar grasas realizando actividad física que las personas delgadas. Estos nuevos hallazgos también repercuten de manera importante en las estrategias de salud pública destinadas a combatir el sobrepeso y la obesidad.

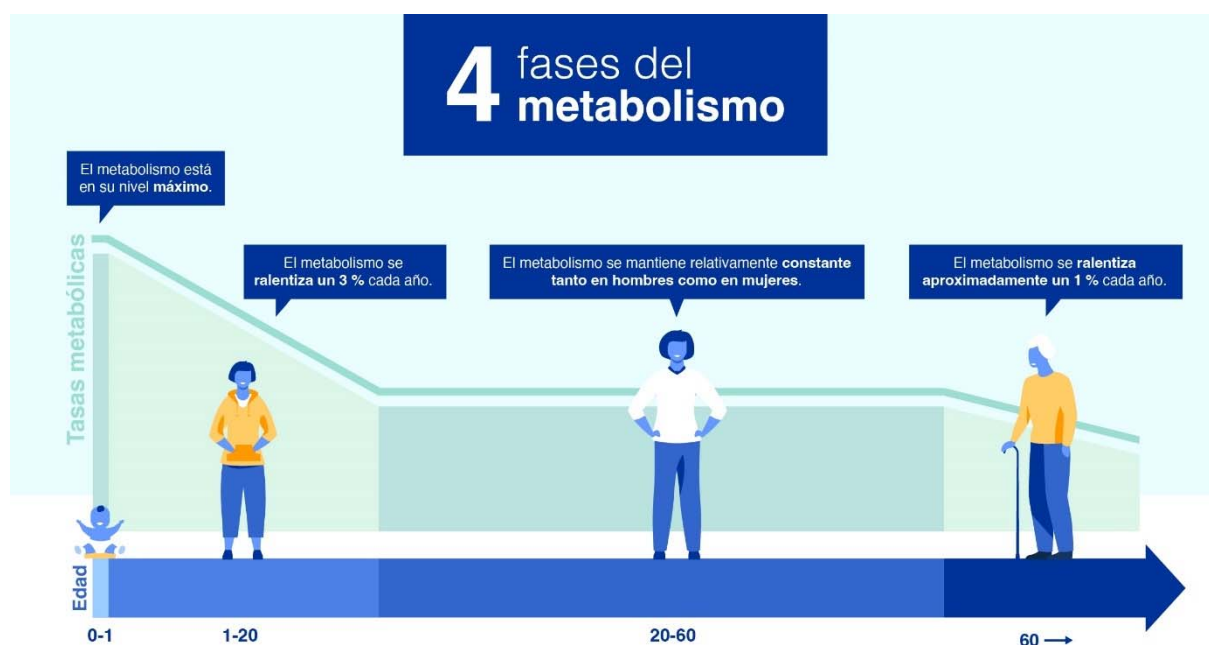


Fig. H-2. Este estudio de referencia, publicado en *Science*, cambió por completo los conocimientos previos sobre el metabolismo.

156. Hay más estudios y publicaciones en curso, centrados en cuestiones como los factores que influyen en la renovación del agua y la cantidad de agua limpia que necesitan beber las personas a diario, el impacto de la temperatura ambiente y el calentamiento global en la demanda de energía, y si el gasto calórico ha disminuido durante la epidemia de obesidad. Se precisan, sin embargo, más datos de los países de ingresos medianos y bajos para reforzar la representación mundial y permitir que los encargados de formular políticas dispongan de los datos empíricos necesarios para priorizar las medidas esenciales en materia de nutrición y hacer frente a la epidemia de obesidad. El Organismo apoyará un nuevo proyecto coordinado de investigación destinado a recopilar más datos sobre el gasto calórico de los países de

<sup>16</sup> “Daily energy expenditure through the human life course”, *Science*, Vol. 373, N° 6556, 13 de agosto de 2021.

<sup>17</sup> “Energy compensation and adiposity in humans”, *Current Biology*, Vol. 31, N° 20, 25 de octubre de 2021.

ingresos medianos y bajos y garantizar que la base de datos del Organismo en materia de agua doblemente marcada siga creciendo y representando a todos los Estados Miembros.

## I. Radioisótopos y tecnología de la radiación

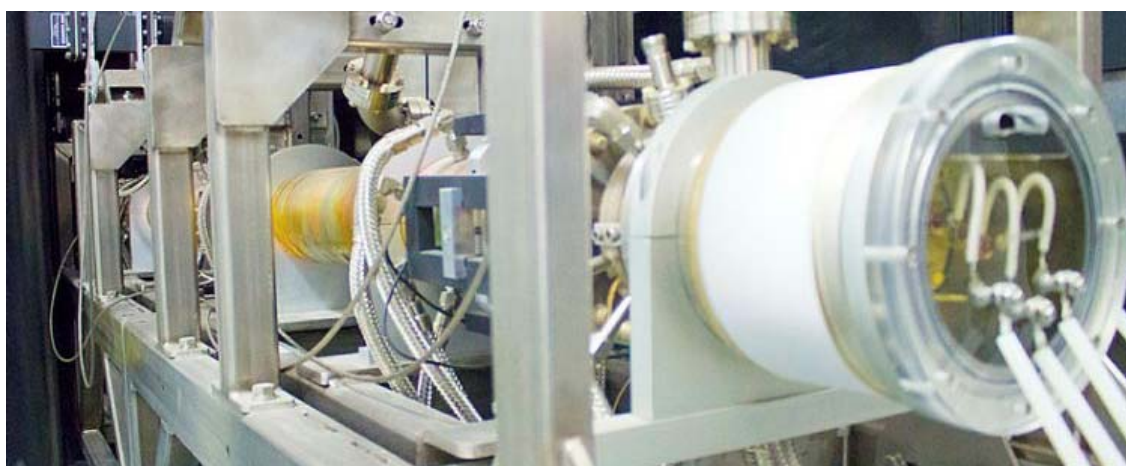
### I.1. Nuevas vías para la producción de radioisótopos de uso médico

#### Situación

157. Los radioisótopos y los radiofármacos, que se utilizan tanto con fines de diagnóstico como de tratamiento en el caso del cáncer y de otras enfermedades crónicas, salvan vidas. Garantizar un suministro constante de los principales radioisótopos es fundamental. Actualmente, los radioisótopos de uso médico, como el molibdeno 99/tecnecio 99m, el flúor 18, el galio 68, el yodo 131 y el lutecio 177, se producen en reactores de investigación y en ciclotrones a partir de las reacciones nucleares que se desencadenan al bombardear con partículas energéticas, como neutrones o protones, el material utilizado como blanco. A raíz de las interrupciones sufridas en el suministro de molibdeno 99 en el período comprendido entre 2007 y 2010, así como en su distribución durante la pandemia de COVID-19, los investigadores y productores están desarrollando maneras alternativas de producir radioisótopos de uso médico. En el Canadá, se aprobó el tecnecio 99m producido por ciclotrón y se está comercializando.

158. Dos nuevas vías de producción de molibdeno 99, a partir de aceleradores lineales y de centrales nucleares, ofrecen nuevas perspectivas para reforzar y potenciar la cadena de suministro global del radioisótopo de uso médico más utilizado del mundo. Existen también iniciativas a escala global para producir radioisótopos de uso médico para agentes terapéuticos innovadores y eficaces mediante reacciones fotodinámicas ( $\gamma, n$ ), especialmente para producir actinio 225 y cobre 67.

159. En la producción de radioisótopos de uso médico pueden utilizarse tecnologías de los aceleradores distintas de los ciclotrones (figura I-1). Los blancos irradiados en los aceleradores lineales experimentan reacciones ( $\gamma, n$ ) y pueden producir múltiples isótopos de uso médico como el molibdeno 99, el actinio 225, el cobre 67 y el escandio 47. mediante haces de electrones de alta energía a fin de generar  $\gamma$ -fotones para esas reacciones (figura I-1). Se está trabajando en una publicación del Organismo que abarcará todas las etapas del proceso.



*Fig. I-1. Vista de un acelerador lineal en la Canadian Isotope Innovations Corp.  
(Fotografía: Canadian Light Source)*



## Tendencias

160. La producción de radioisótopos de cobre 67 y actinio 225 también es posible mediante reacciones fotodinámicas de ese tipo. Debido a su período de semidesintegración, sus emisiones de partículas beta para la terapia y sus emisiones de rayos gamma para el diagnóstico por la imagen, el cobre 67 ha llamado la atención de muchos investigadores y científicos que trabajan en el desarrollo de radiofármacos teranósticos, especialmente los basados en anticuerpos monoclonales. Estudios recientes basados en la reacción fotodinámica ( $\gamma, n$ ) han conseguido producir cobre 67 de alta calidad para la producción de radiofármacos y su utilización en ensayos clínicos en los Estados Unidos de América y Australia.

161. El actinio 225 es otro nucleido de gran interés para tratar a pacientes con cáncer mediante partículas alfa dirigidas. Los informes<sup>18</sup> sobre un nuevo método fotodinámico para la producción de actinio 225 indican que el producto resultante contiene menos impurezas y se obtiene en cantidades mayores que las que se consiguen utilizando otros métodos. Este resultado es importante, puesto que podría contribuir a satisfacer la creciente demanda de actinio 225 en todo el mundo. Un nuevo proyecto coordinado de investigación del Organismo se centrará en la producción y el control de la calidad de los radiofármacos de actinio.

162. La producción de radioisótopos en reactores se basa en la captura de neutrones en un material utilizado como blanco. Los reactores de investigación suelen utilizarse para producir radioisótopos destinados a aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear. La manera habitual de producir radioisótopos como el cobalto 60, utilizado en la industria y la braquiterapia, es irradiando blancos en centrales nucleares. En 2021, una central nuclear comercial de tipo CANDU recibió la autorización del regulador para producir molibdeno 99 (figura#-2). Se está estudiando un enfoque similar para producir en centrales nucleares otros radioisótopos de uso médico de período corto importantes, como el lutecio 177 y el holmio 166. Este avance puede mostrar, asimismo, nuevos horizontes y llevar a los diseñadores a considerar la posibilidad de utilizar reactores de potencia capaces de producir radioisótopos.



*Fig. I-2. En 2021, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear autorizó a la central nuclear de Darlington a producir molibdeno 99, un radioisótopo de uso médico que puede contribuir a salvar vidas. (Fotografía: Ontario Power Generation)*

---

<sup>18</sup> “Actinium-225 production with an electron accelerator”, *Journal of Applied Physics* 129, 104901 (2021)



163. Una adopción más amplia de esas aplicaciones, limitadas actualmente a unos pocos países, podría suponer un cambio de paradigma en la producción de radioisótopos de uso médico en el futuro.

## **J. Inteligencia artificial para las ciencias y las aplicaciones nucleares**

### **Situación**

164. Se entiende por inteligencia artificial (IA) un conjunto de tecnologías que combinan datos numéricos y algoritmos de procesamiento y que aumentan continuamente la potencia de cálculo para desarrollar sistemas capaces de abordar problemas complejos de manera similar a la lógica y el razonamiento humanos. Las tecnologías de la IA pueden analizar grandes cantidades de datos para aprender y evaluar la manera de llevar a cabo una tarea concreta; esta técnica se denomina aprendizaje automático.

165. La inteligencia artificial está avanzando exponencialmente y ya es capaz de clasificar e interpretar enormes cantidades de datos procedentes de diversas fuentes para llevar a cabo una amplia gama de tareas y ayudar a afrontar muchos de los desafíos mundiales más apremiantes. Asimismo, tiene un enorme potencial para acelerar el desarrollo tecnológico en muchos ámbitos de la ciencia nuclear, desde la medicina nuclear hasta la gestión de los recursos hídricos o la ciencia y la industria nucleares. Por ejemplo, la capacidad de la IA para reconocer patrones de datos y analizar imágenes de alta resolución procedentes de satélites, drones o escáneres médicos puede mejorar las respuestas a las emergencias humanitarias, detectar cambios hidroclimáticos globales que anuncien sequías o inundaciones, supervisar y optimizar la productividad agrícola, seguir el rastro de migraciones animales y marinas, y ayudar a los profesionales médicos a detectar y tratar cánceres y otras enfermedades.

166. Combinar la ciencia de los isótopos con la IA proporciona un marco interpretable para extraer nueva información de las pequeñas variaciones isotópicas, lo que ofrece grandes posibilidades en multitud de ámbitos, entre los que cabe destacar la hidrología isotópica, la ecología, la criminalística y la seguridad alimentaria. Los expertos ya aplican enfoques basados en la IA para analizar rápidamente enormes cantidades de datos isotópicos relacionados con el agua que se hallan almacenados en distintas redes mundiales, como la Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación, administrada por el Organismo y la Organización Meteorológica Mundial. El análisis eficaz y eficiente de estos datos posible gracias a la IA ayuda a los científicos a comprender el cambio climático, así como los efectos de este y del crecimiento demográfico en la disponibilidad de agua en todo el mundo.

167. En las actividades de investigación relacionadas con la fusión y las ciencias nucleares, el aprendizaje automático permite optimizar las soluciones de planificación experimental y control en tiempo real necesarias para la explotación sostenida, segura y eficiente de las instalaciones al maximizar la cantidad y aplicabilidad de la información procedente de los datos experimentales y de los obtenidos de las simulaciones.

168. La inteligencia artificial también puede contribuir a la lucha contra el cáncer, y contribuye además a que los costos conexos se mantengan en unos niveles bajos. Los enfoques basados en la inteligencia artificial se aplican para apoyar el diagnóstico y el tratamiento del cáncer mediante una mejor interpretación de las imágenes y una delimitación precisa del contorno tumoral, lo que permite elaborar planes de tratamiento exactos y desarrollar la radioterapia adaptativa, un proceso de radioterapia que se adapta a las variantes anatómicas internas de cada paciente. El aprendizaje automático desempeña un papel cada vez más importante en la imagenología médica en la tarea de predecir, para cada individuo, la

evolución de la enfermedad y la respuesta al tratamiento. La inteligencia artificial también tendrá una función importante en la iniciativa del Organismo Medidas Integradas contra las Enfermedades Zoonóticas (ZODIAC) para ayudar a los expertos a predecir, detectar, evaluar y contener futuros brotes de enfermedades zoonóticas.

### **Tendencias**

169. Un uso mejorado de la IA en las ciencias y las aplicaciones nucleares requiere un esfuerzo conjunto de carácter interdisciplinar, que comprenda la selección y el intercambio de información, y unas actividades de desarrollo transparentes para coordinar y apoyar la colaboración entre investigadores de un amplio espectro de ámbitos.

170. Las tecnologías de la inteligencia artificial precisan de unas sólidas alianzas internacionales y una cooperación transversal para elaborar orientaciones en materia de reglamentación, cuestiones éticas, enseñanza y capacitación, así como para el intercambio de experiencias, conocimientos y buenas prácticas. Esto supone que las aplicaciones de la IA deben ser inclusivas, justas y equitativas, de modo que beneficien a toda la sociedad. Esta cuestión es especialmente importante en el caso de la IA aplicada a las tecnologías nucleares que tienen por objeto lograr un desarrollo equitativo y sostenible para las generaciones presentes y futuras.

171. Reconociendo los beneficios y las oportunidades que aporta la IA, así como sus desafíos, incluidos los motivos de preocupación relacionados con la transparencia, la confianza, la seguridad y la ética, el Organismo está tratando de fomentar un diálogo y una colaboración abiertos para promover la utilización de la IA en las ciencias y las tecnologías nucleares, con el fin de prestar un mejor apoyo a los Estados Miembros en el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos.

172. El movimiento AI for Good, organizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y 38 organizaciones del sistema de las Naciones Unidas, entre ellas el Organismo, es una plataforma digital activa durante todo el año cuyo objetivo consiste en determinar aplicaciones de la IA que permitan acelerar la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (figura J-1). Los dos seminarios web que el Organismo celebró en noviembre de 2021 en el marco de AI for Good, así como una pionera Reunión Técnica sobre Inteligencia Artificial para Tecnología y Aplicaciones Nucleares que tuvo lugar en octubre de 2021, sirvieron de foro internacional y transversal para examinar, definir y fomentar la ciencia, la tecnología y las aplicaciones nucleares.



*Fig. J-1. La plataforma AI for Good reúne a 38 organizaciones del sistema de las Naciones Unidas.  
(Fotografía: UIT)*

173. Gracias a estos eventos se puso de manifiesto de qué manera el desarrollo de bases de datos y el acceso a los datos pueden ser verdaderos motores para las aplicaciones de la IA. Asimismo, se recalcó la importancia de establecer, cuando fuese factible, repositorios centralizados y federados que incluyan datos bien seleccionados para posibilitar el uso de las aplicaciones de la IA y del aprendizaje automático; promover el aprendizaje federado (que trabaja con modelos en lugar de con datos) para entrenar el modelo a partir de distintas bases de datos y crear bibliotecas de información que permitan recopilar referencias para la IA y el aprendizaje automático en la esfera de las tecnologías y aplicaciones nucleares.

174. El Organismo trata de sentar las bases para una innovación continua de la IA en el ámbito de la ciencia y las aplicaciones nucleares estableciendo una plataforma de intercambio de conocimientos denominada IA for Atoms, así como apoyando actividades de reglamentación y capacitación y promoviendo unas orientaciones éticas.

## Anexo

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

País	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2020		Experiencia operacional total hasta 2020	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidades	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
Alemania	6	8 113					852	7
Argentina	3	1 641	1	25	7,9	5,9	91	2
Armenia	1	415			2,0	27,8	46	8
Bangladesh			2	2 160				
Belarús	1	1 110	1	1 110			0	2
Bélgica	7	5 942			41,4	47,6	310	7
Brasil	2	1 884	1	1 340	15,2	2,7	59	3
Bulgaria	2	2 006			15,9	37,5	167	3
Canadá	19	13 624			94,9	14,9	788	6
China	52	49 589	14	13 875	330,1	4,9	418	8
Corea, República de	24	23 150	4	5 360	138,8	26,2	596	2
Emiratos Árabes Unidos	2	2 690	2	2 690			0	5
Eslovaquia	4	1 837	2	880	14,3	53,9	176	7
Eslovenia	1	688			5,5	37,0	39	3
España	7	7 121			55,9	21,4	350	1
Estados Unidos de América	93	95 523	2	2 234	809,4	19,7	4 600	10
Federación de Rusia	38	28 578	3	3 459	195,5	19,7	1 372	5
Finlandia	4	2 794	1	1 600	22,9	34,7	167	4
Francia	56	61 370	1	1 630	382,4	70,6	2 337	0
Hungría	4	1 902			15,4	49,2	142	2
India	23	6 885	6	4 194	40,7	3,2	548	11
Irán, República Islámica del	1	915	1	974	5,9	1,8	9	4
Japón	33	31 679	2	2 653	65,7	7,5	1 932	6
Kazajstán							25	10
México	2	1 552			10,9	4,5	57	11
Países Bajos	1	482			3,7	3,1	76	0
Pakistán	5	2 242	1	1 014	9	6,6	87	5
Reino Unido	13	7 833	2	3 260	51,0	15,6	1 634	7
República Checa	6	3 934			28,6	35,2	176	10
Rumania	2	1 300			10,4	18,5	37	11
Sudáfrica	2	1 860			13,6	6,7	72	3
Suecia	6	6882			64,4	34,0	474	0
Suiza	4	2 960			25,4	23,9	228	11
Türkiye			3	3 342	NA	NA		
Ucrania	15	13 107	2	2 070	78,1	53,9	533	6
<b>Total<sup>b, c</sup></b>	<b>442</b>	<b>394 467</b>	<b>51</b>	<b>53 870</b>	<b>2 586,2</b>		<b>18 772</b>	<b>10</b>

**Nota:** NA - No se aplica.

<sup>a</sup> Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<https://pris.iaea.org/pris/>), a 31 de mayo de 2022.

<sup>b</sup> Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 3 unidades en funcionamiento, 2859 MW(e) y 26,8 TW.h de electricidad suministrada, lo que representa el 10, % del total de la matriz.

<sup>c</sup> La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses) y Lituania (43 años y 6 meses), y las centrales en funcionamiento y en régimen de parada de Taiwán (China) (236 años y 8 meses).

## Cuadro D-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo<sup>19</sup>

Tipo de aplicación <sup>a</sup>	Número de reactores de investigación <sup>b</sup>	Número de Estados Miembros que tienen esas instalaciones
Enseñanza/capacitación	162	50
Análisis por activación neutrónica	117	49
Producción de radioisótopos	83	41
Radiografía neutrónica	69	37
Irradiación de materiales/combustible	68	26
Dispersión neutrónica	44	28
Geocronología	24	21
Transmutación (dopado del silicio)	23	15
Transmutación (gemas)	20	12
Terapia neutrónica, principalmente I+D	15	11
Medición de datos nucleares	14	7
Otras <sup>c</sup>	118	34

<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 235 reactores de investigación examinados (220 en funcionamiento y 15 en régimen de parada temporal a diciembre de 2021).

<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.

---

<sup>19</sup> Situación a diciembre de 2021

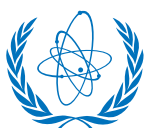


## Abreviaturas y siglas

AMS	espectrometría de masas con aceleradores
ASN	Autoridad de Seguridad Nuclear (Francia)
BioPAN	metodología bioinformática para el análisis de vías
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
Combustible MOX	combustible de óxidos mixtos
COVID-19	enfermedad por coronavirus de 2019
CP26	26º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2021)
CP27	27º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022)
DSRS	fuelle radiactiva sellada en desuso
DTT	instalación Divertor Tokamak Test
EDF	Electricité de France (Francia)
EEl	Estación Espacial Internacional
ESS	Fuente Europea de Espalación
EURECA	vehículo europeo recuperable de transporte
EXPOSE	carga útil acoplada externamente para la primera fase de utilización
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FEPC	Federación de Compañías de Energía Eléctrica (Japón)
GW(e)	gigavatio (eléctrico)
GW·h	gigavatio-hora
HTR	reactor de alta temperatura
HTTR	reactor experimental de alta temperatura
I+D	investigación y desarrollo
INIR	Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear
iPWR	PWR integrado
JEM	módulo experimental japonés
JMTR	reactor de ensayo de materiales del Japón
LDEF	Instalación de Exposición de Larga Duración
LWR	reactor de agua ligera
MW(e)	megavatio eléctrico
MW(t)	megavatio térmico
NNL	Laboratorio Nuclear Nacional (Reino Unido )
NORM	material radiactivo natural
NPPA	Autoridad de Centrales Nucleares (Egipto)
NRC	Comisión Reguladora Nuclear (Estados Unidos de América)
NUTEC Plastics	TECnología NUclear para el Control de la Contaminación por Plásticos
O/OREOS	exposición de organismos y de materia orgánica al estrés orbital
PET	tomografía por emisión de positrones
PHWR	reactor de agua pesada a presión
PWR	reactor de agua a presión
rPE/rPP	polietileno reciclado y polipropileno reciclado
SCWR	reactor supercrítico refrigerado por agua
SESLO	supervivencia de los organismos vivos en un entorno espacial
SFR	reactor rápido refrigerado por sodio
SMART	reactor modular avanzado integrado
SMR	reactores pequeños y medianos o modulares
STEP	Tokamak Esférico para la Producción de Energía
t HM	toneladas de metal pesado
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UKAEA	Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido
UME	uranio muy enriquecido
UPE	uranio poco enriquecido

URF	instalación subterránea de investigación
WCR	reactor refrigerado por agua
XFR	fluorescencia de rayos X
ZODIAC	Medidas Integradas contra las Enfermedades Zoonóticas





**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)