

Examen de la Tecnología Nuclear de 2023

Informe del Director General

GC(67)/INF/4

Impreso por el OIEA en Austria
Septiembre de 2023
OIEA/NTR/2023

Índice

Resumen	3
Prefacio del Director General	4
Resumen ejecutivo	5
A. Energía nucleoelectrica	9
A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrica	9
A.2. Centrales nucleares en funcionamiento	11
A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansión	13
A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica	16
A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua	17
A.4.2. Reactores pequeños y medianos o modulares y microrreactores	18
A.4.3. Reactores rápidos	19
A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica	21
B. Ciclo del combustible nuclear	23
B.1. Parte inicial	23
B.2. Parte final	26
C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos	28
C.1. Clausura	28
C.2. Rehabilitación ambiental y gestión del material radiactivo natural	32
C.3. Gestión de desechos radiactivos	34
D. Investigación y desarrollo tecnológico de la fusión nuclear para la producción de energía en el futuro	37
E. Reactores de investigación, aceleradores de partículas e instrumentación nuclear	42
E.1. Reactores de investigación	42
E.2. Aceleradores de partículas	44
E.3. Instrumentación nuclear	46
F. Alimentación y agricultura	48
F.1. Respuesta rápida a las crisis de inocuidad de los alimentos	48
F.2. Avances en la irradiación de alimentos: mayor uso de fuentes mecánicas y nueva tecnología de haces blandos	51
G. Radioisótopos y tecnología de la radiación	57
G.1. Novedades en el ámbito de los radiofármacos teranósticos	57
H. Salud humana	60
H.1. Inteligencia artificial para la delimitación y la planificación de la radioterapia	60
I. Medio ambiente marino	63
I.1. Contaminantes emergentes	63
I.2. Nuevos radiotrazadores de la circulación oceánica para mejorar la comprensión y la modelización del transporte de contaminantes y del cambio oceánico y climático	67
Anexo	73

Resumen

- En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio *Examen de la Tecnología Nuclear*. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en el que se destacan las novedades importantes ocurridas en 2022.
- El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2023* trata sobre los siguientes temas: la energía nucleoelectrónica, el ciclo del combustible nuclear, la clausura, la rehabilitación ambiental y la gestión de desechos radiactivos, la investigación y el desarrollo tecnológico de la fusión nuclear para la producción de energía en el futuro, los reactores de investigación, los aceleradores de partículas y la instrumentación nuclear, la alimentación y la agricultura, los radioisótopos y la tecnología de la radiación, la salud humana y el medio ambiente marino.
- La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores en su reunión de marzo de 2023, en el documento GOV/2023/3. La presente versión definitiva se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones habidas durante la Junta de Gobernadores así como las observaciones recibidas de los Estados Miembros.

Prefacio del Director General

Tanto si es para producir energía de forma fiable y con bajas emisiones de carbono como para enfrentar problemas relativos a la alimentación, la salud, el agua y el medio ambiente, las tecnologías nucleares desempeñan un papel importante a la hora de hacer frente a muchos de nuestros desafíos más apremiantes.

En 2022, la convergencia de la crisis climática mundial con la agitación de los mercados energéticos trajo consigo un interés renovado de los Estados Miembros por la capacidad de la energía nucleoelectrica para ayudar a lograr emisiones netas cero y garantizar la seguridad del suministro de energía. Al mismo tiempo, un número creciente de países utiliza tecnologías nucleares para aplicaciones no eléctricas, como proteger los recursos hídricos, desarrollar una agricultura más inteligente y salvar vidas mediante una mejor atención oncológica.

En la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP27) de 2022, celebrada en Sharm El Sheikh (Egipto), el OIEA supervisó el primer pabellón en la historia de este evento dedicado a exponer los beneficios de las tecnologías nucleares para mitigar el cambio climático, así como para monitorizarlo y adaptarse a sus efectos. Además, con el fin de dar a conocer en mayor medida las posibilidades que encierra la energía nucleoelectrica para descarbonizar la energía más allá de la electricidad, en la CP 27 se puso en marcha la iniciativa Atoms4NetZero. Tomando estas actividades como punto de partida, el Organismo seguirá manteniendo conversaciones con los Estados Miembros y la comunidad internacional en sentido amplio en la CP28, que se celebrará en Dubai (Emiratos Árabes Unidos), con respecto a la importante función que desempeñan la energía nuclear y sus aplicaciones pacíficas para enfrentar la crisis climática.

Durante décadas, la ciencia y la tecnología nucleares han estado a la altura de las circunstancias para ayudar a los países a satisfacer sus necesidades de desarrollo. Sin lugar a dudas, pueden contribuir más y en más ámbitos. Al poner de manifiesto los avances clave en la tecnología nuclear que se han producido en 2022, el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2023* ayudará a los Estados Miembros a tomar decisiones fundamentadas sobre la vía adecuada que deben tomar para enfrentar los desafíos actuales y futuros.



Fig. FW-1. Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA, durante una intervención en la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022 (CP27), celebrada en Sharm El-Sheikh (Egipto).

Resumen ejecutivo

1. Por segundo año consecutivo, el Organismo ha revisado al alza sus proyecciones anuales sobre el crecimiento potencial de la energía nucleoelectrica para los próximos decenios, a fin de reflejar un cambio en el debate mundial sobre la energía y el medio ambiente entre crecientes preocupaciones con respecto a la seguridad energética y el cambio climático. La creciente penetración de las fuentes de energía renovable variables puede provocar la inestabilidad de las redes eléctricas, situación que las centrales nucleares pueden compensar mediante un suministro de energía estable y limpia. El Organismo ha aumentado su proyección alta hasta los 873 gigavatios (GW) para 2050, lo cual supone un aumento del 10 % con respecto a la proyección alta del año anterior. En función del nivel de electrificación mundial, la energía nucleoelectrica podría representar hasta un 14 % de la matriz de electricidad en 2050, lo cual supondría un aumento sustancial con respecto al actual 9,8 %.
2. Al final de 2022, la capacidad nucleoelectrica mundial se situaba en 393,8 gigavatios (eléctricos) (GW(e)) suministrados por 438 reactores nucleares en funcionamiento en 32 países. En 2022 se conectaron a la red más de 7,4 GW(e) de nueva capacidad en cinco países. Según los informes presentados al Organismo por los países en cuestión, las centrales nucleares generaron cerca de 2486,8 teravatios-hora de electricidad distribuable y con bajas emisiones de carbono.
3. La crisis energética de 2022 ha dejado en suspenso algunas decisiones relativas a la parada de reactores y ha impulsado a explotadores y reguladores a adoptar medidas destinadas a garantizar una explotación a largo plazo segura y fiable. La continua y creciente demanda de generación de electricidad segura, limpia, fiable y eficaz en relación con el costo supone un fuerte impulso para que los explotadores amplíen en varios decenios la vida operacional de las centrales nucleares mediante la modernización de las centrales y la mejora del equipo y los sistemas primordiales en apoyo de la explotación a largo plazo.
4. De los 50 Estados Miembros que han mostrado interés por implantar la energía nucleoelectrica, 24 están en la etapa previa a la toma de decisiones e inmersos en actividades de planificación. Los 26 países restantes ya están trabajando a ese respecto. Para 2035, el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría aumentar en un 30 % gracias a la incorporación de entre 10 y 12 nuevos países con centrales nucleares en funcionamiento frente a los 32 países actuales. Este creciente interés en incorporar energía nucleoelectrica requiere un desarrollo adecuado de infraestructura nuclear.
5. Los reactores refrigerados por agua (WCR) siguen desempeñando un papel importante en la industria nuclear comercial, y actualmente representan más del 95 % de todos los reactores de potencia civiles en funcionamiento en el mundo. El desarrollo de la tecnología nucleoelectrica mundial se centra en acelerar el despliegue de reactores avanzados, sobre todo de reactores pequeños y medianos o modulares (SMR), así como en ampliar el uso de la energía nucleoelectrica a aplicaciones no eléctricas como la calefacción urbana, la producción de hidrógeno y la desalación.
6. La cogeneración de electricidad y calor para aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear es una tecnología fiable y demostrada que concita un creciente interés en todo el mundo y que tiene amplias perspectivas de mercado y un gran potencial de desarrollo. Varios países están estudiando la posibilidad de producir hidrógeno a partir de electricidad o del calor generado por reactores nucleares, así como de desalar agua.
7. El avance tecnológico que capta la atención de los responsables de la planificación energética y los encargados de formular políticas es la disponibilidad y el despliegue previstos de varios diseños

novedosos de SMR para 2030. Debido a ello, varios países en fase de incorporación al ámbito nuclear han incluido los SMR en sus consideraciones tecnológicas o siguen supervisando los avances al respecto. En 18 Estados Miembros hay más de 80 diseños de SMR de importantes líneas de tecnología en distintas etapas de desarrollo y despliegue. Se están haciendo importantes esfuerzos industriales y en materia de reglamentación para facilitar el desarrollo de diseños y un despliegue temprano, también por medio de la Plataforma del OIEA sobre SMR y la Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear.

8. Con la llegada de potentes capacidades de computación y herramientas de análisis de datos, la industria nuclear está adoptando la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático o *machine learning* (ML) y las técnicas de aprendizaje profundo o *deep learning* para renovar los sistemas de operación y los sistemas de mantenimiento a corto y largo plazo, así como las técnicas avanzadas de fabricación. La tecnología de cadenas de bloques está demostrando una variedad de posibles aplicaciones a lo largo de toda la cadena de suministro de la energía nucleoelectrónica.

9. Además de la ciencia experimental de la fusión nuclear, los Estados Miembros están acelerando el desarrollo tecnológico de la fusión nuclear con su aparición en el sector privado, el posterior e importante aumento del capital invertido y los grandes avances recientes, así como con la marcha de los proyectos de fusión nacionales e internacionales a gran escala. La eficacia en la modelización de la dinámica del plasma basada en la inteligencia artificial y en el control de los experimentos de fusión en tiempo real ha registrado enormes mejoras que han acelerado la vía hacia la energía de fusión.

10. Las primeras operaciones relacionadas con el plasma en el marco del proyecto del ITER avanzaron a buen ritmo. En junio de 2022 el proyecto alcanzó el hito de haberse completado en un 77 %. No obstante, se prevén retrasos en el plan de trabajo original debido a los efectos de la pandemia de COVID-19 y dificultades técnicas como la necesidad de reparar algunos componentes clave.

11. El aumento sostenido del precio al contado del uranio ha revitalizado la industria de la producción de uranio, y varios productores primarios están intentando reanudar sus operaciones que, debido al bajo precio al contado, estaban en régimen de cuidado y mantenimiento. Con las señales positivas en el mercado del uranio en los dos últimos años, la actividad de prospección está aumentando.

12. El combustible nuclear gastado almacenado está acumulándose a un ritmo de aproximadamente 7000 toneladas de metal pesado (t HM) al año en todo el mundo, y el inventario almacenado ronda las 320 000 t HM. Para los países con programas nucleares establecidos desde hace tiempo que siguen estrategias de ciclo abierto, los principales retos siguen siendo la necesidad de capacidad adicional de almacenamiento de combustible nuclear gastado y la duración cada vez mayor del almacenamiento previo a la disposición final. Para los países que aplican estrategias de ciclo cerrado del combustible nuclear, el combustible nuclear gastado puede volver a procesarse y a reciclarse para una nueva producción de combustible.

13. Las tecnologías digitales tienen cada vez más importancia en el avance de los proyectos de clausura de instalaciones nucleares, pues permiten una mejor planificación y ejecución, incluida una mejor visualización de los escenarios de clausura, tanto por parte de los operadores como de las partes interesadas externas. Se está estudiando en profundidad la realidad aumentada y la realidad virtual para prestar apoyo a actividades de clausura y de capacitación de los operadores.

14. En la esfera de la rehabilitación ambiental se observa una nueva tendencia que consiste en ampliar el concepto de reducción de daños de modo que incluya la adición de valor para un emplazamiento contaminado. La rehabilitación es también una fase crítica de las operaciones mineras en el marco de una economía circular, ya que ofrece la posibilidad de regenerar el emplazamiento para futuros fines productivos.

15. En 2022 siguieron registrándose importantes avances en la gestión de desechos radiactivos, especialmente en relación con los programas de repositorios geológicos profundos y la continuación del despliegue seguro de tecnologías de gestión previa a la disposición final.

16. Se ha registrado un aumento en la devolución de fuentes de actividad alta en desuso a los proveedores para su reciclaje y disposición final. En 2023 se prevé retirar más de 30 fuentes de actividad alta en casi una docena de Estados Miembros. 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.

17. Siguió aumentando el interés a escala mundial en los reactores de investigación. Además de los 233 reactores de investigación en funcionamiento, se estaban construyendo otros 11. La proporción de reactores de investigación que llevan al menos 40 años en funcionamiento se está acercando al 70 %. Algunas entidades que explotan reactores de investigación con un alto grado de utilización están considerando la posibilidad de prolongar su vida útil entre 80 y 100 años.

18. Las aplicaciones de la IA a gran escala han revolucionado el mundo de la física de alta energía. Conforme va aumentando la luminosidad de los aceleradores de hadrones, el número de partículas que se producen en cada colisión es cada vez mayor. En consecuencia, los detectores de seguimiento tienen que funcionar a tasas de recuento más elevadas, posiblemente con recuentos de fondo más altos, ya que el objetivo son los canales de descubrimiento de sondas poco frecuentes.

19. La tendencia a utilizar vehículos aéreos no tripulados para la detección y vigilancia de la radiación se ve influida actualmente por nuevos parámetros tendentes a una mayor carga útil, seguridad y durabilidad de vuelo, resistencia y precisión de la orientación. En la actualidad existen en el mercado nuevos vehículos aéreos no tripulados para la detección de radiaciones y la espectrometría gamma, que ofrecen una solución completa para la cartografía radiológica y otras aplicaciones.

20. Las crisis y emergencias recientes, como la pandemia de COVID-19, los conflictos y los desastres naturales relacionados con el clima, han puesto de manifiesto la vulnerabilidad del suministro mundial de alimentos en situaciones de tensión, así como la necesidad de incrementar la resiliencia mediante la reforma de los sistemas de control de los alimentos y la mejora del apoyo técnico. La aplicación de técnicas analíticas nucleares nuevas y de reciente aparición para el análisis de alimentos sobre el terreno puede ofrecer una respuesta eficaz a situaciones que afecten al suministro de alimentos y la seguridad alimentaria.

21. En unos 70 países se irradia al menos un tipo de producto alimenticio a fin de mejorar la seguridad alimentaria, mantener la calidad de los alimentos y ampliar su tiempo de conservación. Debido a ventajas tanto económicas como prácticas, el uso de la irradiación con fuentes mecánicas se está expandiendo; por ejemplo, el uso de haces de baja energía (electrones blandos o rayos X blandos). Esas tecnologías alternativas ayudan a complementar la capacidad disponible de instalaciones de irradiación gamma y permiten ampliar el uso de la irradiación de alimentos.

22. En la teranóstica, un radionucleido empleado para diagnosticar el cáncer se utiliza con otro para el tratamiento. Debido a los avances recientes en imagenología molecular así como en aplicaciones terapéuticas, es necesario que los profesionales sanitarios tengan a su disposición más radioisótopos de reciente aparición. Gracias a los avances tecnológicos en la producción de radionucleidos, la lista de radionucleidos prometedores para aplicaciones radiofarmacéuticas es cada vez mayor, lo que ayudará a mejorar los resultados de los pacientes.

23. El tritio, que es el único isótopo radiactivo dentro de la molécula del agua, es un valioso trazador de los procesos del ciclo del agua y, por ello, ayuda a estimar la recarga de agua subterránea y evaluar

la vulnerabilidad a la contaminación. Debido a la baja concentración actual de tritio en las aguas naturales, los métodos estándar de medición precisan de un enriquecimiento en tritio significativo y prolongado para obtener resultados exactos y precisos. Un nuevo sistema de enriquecimiento en tritio desarrollado por el Organismo promete revolucionar la capacidad de los Estados Miembros de determinar la concentración de tritio en las muestras de agua a niveles ultrabajos para fines de monitorización hidrológica.

24. Aproximadamente la mitad de los pacientes con cáncer necesita someterse a radioterapia en algún momento. La inteligencia artificial (IA) podría ofrecer una solución a la escasez mundial de personal sanitario. La IA puede aumentar la calidad y la normalización y ahorrar tiempo, sobre todo en la delimitación, un paso crucial en la radioterapia, durante el cual se delimitan los órganos, los tejidos normales y el tumor. La inteligencia híbrida, que combina los puntos fuertes tanto de la inteligencia natural como de la artificial, se podría utilizar para acometer delimitaciones difíciles en las que deban realizarse ajustes manuales o comprobaciones.

25. Hay claras señales que advierten de una “pandemia silenciosa” de contaminantes emergentes (CE). Los CE son sustancias detectadas en el medio ambiente que no están abarcadas en los programas de vigilancia reglamentaria. Las técnicas de muestreo pasivo pueden detectar miles de sustancias químicas presentes en el medio marino y facilitar la identificación de compuestos hasta entonces desconocidos. Los avances en el muestreo de agua y las técnicas avanzadas de cribado analítico pueden ayudar a afrontar algunos de los desafíos planteados por las complejas mezclas de CE presentes en el medio marino.

26. Los radiotrazadores se utilizan para rastrear el movimiento del agua de mar y comprender los ecosistemas marinos y costeros. Permiten monitorizar los contaminantes radiactivos y no radiactivos, como los microplásticos y el metilmercurio, y ayudan a detectar y cuantificar la presencia de biotoxinas en los alimentos de origen marino, evaluar el impacto de la acidificación de los océanos en los organismos calcificadores y valorar los procesos metabólicos con las temperaturas en aumento. Los avances recientes en la espectrometría de masas han abierto posibilidades de detectar y analizar radionucleidos de período largo en concentraciones ambientales ultrabajos.

A. Energía nucleoelectrónica

A.1. Proyecciones de la energía nucleoelectrónica

Situación

1. Por segundo año consecutivo, el Organismo ha revisado sus proyecciones anuales sobre el crecimiento potencial de la energía nucleoelectrónica para los próximos decenios, a fin de reflejar un cambio en el debate mundial sobre la energía y el medio ambiente entre crecientes preocupaciones con respecto a la seguridad energética y el cambio climático.

2. En su nueva perspectiva sobre la capacidad nuclear mundial para la generación de electricidad, el Organismo ha aumentado su proyección alta hasta los 873 gigavatios (GW) para 2050, lo cual supone un aumento del 10 % con respecto a la proyección alta del año anterior. Para la materialización de este proyecto, sería necesaria una aplicación a gran escala de la explotación a largo plazo en todo el parque actual de centrales nucleares y casi 600 GW en nueva capacidad de generación durante los tres próximos decenios. Para ello haría falta que la industria realizara sus proyectos dentro de los plazos y los presupuestos previstos, se facilitara el acceso al financiamiento y se avanzara hacia la armonización de los requisitos reglamentarios y la normalización de los enfoques industriales. Esas acciones son de especial importancia en el caso de nuevas tecnologías como los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR) y otros reactores avanzados, de los que se espera que desempeñen un papel clave en la descarbonización del sector energético mediante el suministro de calor o hidrógeno con bajas emisiones de carbono a sectores que no se pueden electrificar.

873 GW
en **2050**

3. En función del nivel de electrificación mundial, la energía nucleoelectrónica podría representar hasta un 14 % de la matriz de electricidad, lo cual supondría un aumento con respecto al actual 9,8 %. En la proyección baja, la capacidad nuclear instalada de aquí a 2050 permanecería estable en alrededor de 400 GW, pero la parte correspondiente a la electricidad nuclear podría caer hasta el 6,9 % debido a una mayor contribución de otras fuentes.

4. El 27º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP27) celebrado en Sharm El Sheikh (Egipto), en noviembre de 2022, se mantuvieron debates de alto nivel sobre la contribución de la energía nucleoelectrónica a un suministro de energía asequible, resiliente y seguro,

En función del nivel de electrificación mundial, la energía nucleoelectrónica podría representar



hasta el **14 %** de la matriz de electricidad, un incremento del **9,8 %** actual.

En la proyección baja, la capacidad nuclear instalada de aquí a **2050** permanecería estable en **alrededor de 400 GW**, pero la parte correspondiente a la electricidad nuclear podría bajar al **6,9 %**.

así como sobre su contribución a sistemas energéticos descarbonizados, lo que proporciona un pilar esencial para el despliegue de las energías renovables (figura A.1). La financiación de la transición hacia una energía limpia —y la financiación de proyectos nucleares en particular— sigue siendo un desafío,

si bien en 2022 hubo algunos avances positivos, como la inclusión de la energía nucleoelectrica en la taxonomía de finanzas sostenibles de la Unión Europea (UE), así como en otras taxonomías de todo el mundo.



Fig. A.1. El Director General del Organismo, Rafael Mariano Grossi, con Gerd Müller, Director General de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, y Olga Algayerova, Secretaria Ejecutiva de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, durante el evento paralelo “Interplay of Low Carbon Technologies for Resilient Net Zero Energy Systems” de la CP27. (Fotografía: OIEA)

Tendencias

5. Existe un interés considerable y creciente en las tecnologías de reactores avanzados e innovadores, entre ellos los SMR y sus aplicaciones. Se prevé que, en los próximos tres decenios, el grueso de la capacidad añadida provenga de los SMR, así como de los reactores avanzados refrigerados por agua de grandes dimensiones, que permitirán producir energía con bajas emisiones de carbono para combatir el cambio climático y garantizar la seguridad del suministro energético a un precio asequible. El sector nuclear seguirá abordando diversos desafíos, como las reducciones de costos, la creación de capacidad y la mejora de la armonización y la normalización en los ámbitos regulador e industrial, a fin de mejorar la competitividad y acelerar el despliegue de la nueva capacidad nucleoelectrica. Para apoyar esos esfuerzos de los Estados Miembros, el Director General del OIEA ha lanzado en 2022 la Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear (NHSI), que ofrece a todas las partes interesadas del ámbito nuclear (gobiernos, reguladores y la industria) una oportunidad única para trabajar de forma sinérgica hacia el objetivo común del despliegue mundial de reactores avanzados tecnológica y físicamente seguros, con especial atención a la tecnología de los SMR (figura A.2).



Fig. A.2. El Director General del Organismo, Rafael Mariano Grossi, da inicio a la reunión inaugural de la Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear (NHSI) celebrada en la Sede del Organismo en Viena (Austria) en junio de 2022.

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

A.2. Centrales nucleares en funcionamiento

Situación

7. Al final de 2022, la capacidad nucleoelectrica mundial se situaba en 393,8 GW(e) generados por 438 reactores nucleares en funcionamiento en 32 países. En 2022, más de 22,8 GW(e) de la capacidad operacional total disponible (27 reactores) se encontraba en situación de suspensión de operaciones.

8. Se conectaron más de 7,4 GW(e) de nueva capacidad a la red en 2022, comprendidos 5,6 GW(e) de capacidad operacional adicional en Asia y 1,6 GW(e) en Europa. En China, dos reactores empezaron a suministrar electricidad a la red en 2022: el reactor Fuqing-6 (1075 megavatios (eléctricos) (MW(e)) —el segundo de los dos reactores de demostración Hualong 1 (HPR1000) presentes en el



Al final de noviembre de 2022, había una capacidad nucleoelectrica mundial en funcionamiento de

393,8 GW(e)
generados por

438 reactores en funcionamiento

en **32** países

emplazamiento— se conectó a la red en enero, y el Hongyanhe-6, en la provincia de Liaoning —un reactor de agua a presión (PWR) ACPR-1000 de tercera generación con una capacidad total de 1061 MW(e)— se conectó a la red en mayo. En la República de Corea, en junio se conectó a la red un PWR (A d PR-1400) de 1340 MW(e) en la central nuclear de Hanul.

9. En marzo, en la central nuclear de Karachi, ubicada en Sindh, provincia meridional del Pakistán, se conectó a la red un reactor HPR1000 suministrado por China. La unidad 3 de la central nuclear de Barakah, en los Emiratos Árabes Unidos, inició sus operaciones en octubre y añadió 1345 MW(e) de capacidad nuclear. En Finlandia, el reactor europeo de agua a presión (EPR) Olkiluoto-3, de 1600 MW(e), se conectó a la red en marzo.

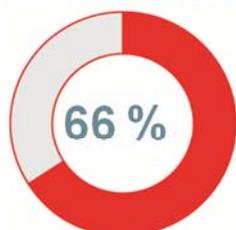
10. Al final de 2022 había en construcción en 18 países una capacidad total 59,3 GW(e) (58 reactores). La capacidad nucleoelectrica instalada en construcción se ha mantenido en gran medida estable durante los últimos años, salvo en Asia, donde ha habido un crecimiento continuo y donde, desde 2012, se ha conectado a la red una capacidad operacional de 56,1 GW(e) (55 reactores).

11. Alrededor del 66 % de la capacidad mundial de reactores en funcionamiento (258,7 GW(e), 291 reactores) lleva en funcionamiento más de 30 años, mientras que más del 26 % (101,5 GW(e), 128 reactores) lleva funcionando más de 40 años y el 3 % (11 GW(e), 13 reactores), más de 50 años. El envejecimiento del parque de centrales nucleares pone de manifiesto la necesidad de renovar o aumentar la capacidad nuclear a fin de compensar las retiradas de servicio



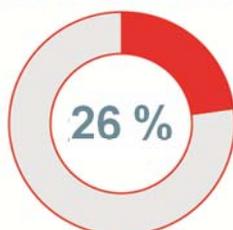
previstas y contribuir a la sostenibilidad y a la seguridad energética mundial, así como a los objetivos relativos al cambio climático. Gobiernos, empresas de servicios públicos y otras partes interesadas están invirtiendo en programas de explotación a largo plazo y de gestión del envejecimiento para un número cada vez mayor de reactores a fin de garantizar una explotación sostenible y una transición expedita a esta nueva capacidad.

258,7 GW(e)
291 reactores



En funcionamiento durante más de 30 años

101,5 GW(e)
128 reactores



En funcionamiento durante más de 40 años

11 GW(e)
13 reactores



En funcionamiento durante más de 50 años

12. Incluso a medida que las centrales nucleares envejecen, los reactores nucleares de potencia que se encuentran en funcionamiento siguen demostrando unos elevados niveles de fiabilidad y rendimiento. El factor de carga, también conocido como factor de capacidad, es la energía producida realmente por un reactor dividida por la energía que podría haber generado si funcionara durante todo el año a su potencia de referencia por unidad. Un elevado factor de carga indica un buen rendimiento operacional.

Tendencias

13. El crecimiento de la capacidad nucleoelectrica ha sido constante en el último decenio, con un incremento de 20,3 GW(e) entre 2012 y 2022. Durante ese período se conectaron a la red 68 reactores con 67,8 GW(e) de capacidad nuclear. Más del 83 % de este crecimiento de capacidad se dio en Asia, donde se conectó a la red una capacidad total de 56,2 GW(e) (55 reactores). Según los informes proporcionados al Organismo, en 2022 las centrales nucleares generaron cerca de 2486,8 teravatios-hora (TW·h) de electricidad distribuable y con bajas emisiones de carbono.

14. La crisis energética de 2022 ha dejado en suspenso algunas decisiones relativas a la parada de reactores (en Bélgica, en los Estados Unidos de América y en Suecia), y ha impulsado a explotadores y reguladores a adoptar medidas destinadas a garantizar una explotación a largo plazo segura y fiable.

A.3. Programas nucleoelectricos nuevos o en expansión

Situación

15. De los 50 Estados Miembros que han mostrado interés por implantar la energía nucleoelectrica, 24 están en la etapa previa a la toma de decisiones 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 (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 adopción de decisiones: 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 o ya las han comenzado (Arabia Saudita, Bangladesh, Egipto, Ghana, Jordania, Kenya, Nigeria, Polonia, Türkiye y Uzbekistán).

26 países en fase de incorporación al ámbito nuclear

16

en la fase de toma de decisiones

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



10

en la fase posterior a la toma de decisiones

Países que han adoptado una decisión y están construyendo la infraestructura, o que han firmado un contrato y están preparando la construcción o la han iniciado



16. En Bangladesh se está construyendo la primera central nuclear y se prevé que en 2023 se entregue combustible en el emplazamiento y que, en los próximos años, se proceda a la explotación comercial de las dos unidades. En 2022 prosiguió la construcción de las cuatro unidades de la central nuclear de Akkuyu, en Türkiye. Según los planes, la puesta en servicio de las cuatro unidades tendrá lugar entre 2023 y 2026. En la central nuclear de El Dabaa, en Egipto, se realizó en julio el primer hormigonado de la unidad 1 y en noviembre de 2022 el de la unidad 2. La Autoridad de Centrales Nucleares (NPPA) también solicitó una licencia de construcción para las unidades 3 y 4 en 2021. Continúan los trabajos de preparación del emplazamiento para las obras de construcción. Ambas organizaciones clave (la NPPA y la Autoridad Reguladora Nuclear y Radiológica de Egipto) siguen desarrollando capacidad organizativa conforme a las necesidades del programa. En Polonia, finalizó la selección de tecnologías y proveedores para la construcción, de aquí a 2042, de PWR con una capacidad total de energía nucleoelectrica instalada de entre 6000 y 9000 MW(e).

17. En la Arabia Saudita se publicaron 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 iniciado un estudio de viabilidad para encontrar la tecnología preferida y el proveedor, y para tomar una decisión de inversión con respecto al uso de SMR destinados a la producción de electricidad y la desalación de agua de mar. Las especificaciones de la convocatoria de licitación para el proyecto de SMR están previstas para 2026. Ghana siguió trabajando en el desarrollo de su infraestructura nacional para

la implantación de un programa nucleoelectrico, incluido un mayor desarrollo de las capacidades de las instituciones clave. Este país amplió la tecnología de reactores que había seleccionado e incluyó los SMR, y cinco proveedores respondieron a una solicitud de manifestaciones de interés de potenciales proveedores para el desarrollo de alrededor de 1000 MW(e) de capacidad. Está previsto que las obras de construcción de la primera central nuclear se inicien en 2023 y que la instalación entre en servicio en 2029. Kenya ha anunciado que estudiará la posibilidad de construir un reactor de investigación y SMR en lugar de centrales nucleares de grandes dimensiones. En Uzbekistán se ha iniciado la caracterización del emplazamiento y la concesión de licencias para centrales nucleares con un total de 2400 GW(e) de capacidad instalada. La puesta en servicio de la primera central nuclear está prevista para el período comprendido entre 2026 y 2030. En 2022 se firmó la postura nacional de Filipinas con respecto a un programa de energía nuclear basado en un estudio realizado por el Gobierno. Esta decisión allanó el terreno para realizar más estudios y evaluar opciones disponibles entre reactores de gran tamaño, incluida la posible rehabilitación de la central nuclear de Bataan, o SMR. Estonia está contemplando la posibilidad de utilizar SMR para su programa nucleoelectrico, y la organización encargada de ejecutar el programa de energía nuclear para el Gobierno elaboró un informe provisional en el que evalúa las condiciones para la puesta en marcha de un programa nucleoelectrico basado en SMR, así como la viabilidad de dicho programa. Para muchos de estos países, la incorporación de la energía nucleoelectrica 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 nucleoelectrica en las contribuciones determinadas a nivel nacional que presentaron en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en el marco del Acuerdo de París.

18. En 2022, Sri Lanka acogió una misión del servicio de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) (Fase 1) del Organismo. El Organismo también recibió solicitudes de Estonia para una misión INIR de Fase 1; de Kazajstán, para una misión INIR de seguimiento de Fase 1; y de Türkiye, para una misión INIR de Fase 3. En diciembre de 2021, el Organismo recibió una solicitud de misión INIR de Fase 3 para Bangladesh, que se llevará a cabo a principios de 2024. Además, 15 Estados Miembros tienen planes de trabajo integrados en aplicación y, a medida que se han flexibilizado las restricciones relacionadas con la COVID-19, han reanudado las actividades.

Tendencias

19. Para 2035, el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría aumentar en un 30 % gracias a la incorporación de entre 10 y 12 nuevos países con centrales nucleares en funcionamiento frente a los 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.

20. El avance tecnológico que capta la atención de los responsables de la planificación energética y los encargados de formular políticas es la disponibilidad y el despliegue previstos de varios diseños novedosos de SMR para 2030.

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, Ghana, Filipinas, Indonesia, Jordania, Kenya, Polonia, el Sudán, Uganda y Zambia, y países en fase de ampliación como Bulgaria, la República Checa, Rumania y Sudáfrica. El interés de todos


De aquí a 2035
 el número de países que tienen
 centrales en funcionamiento
 podría aumentar en un **30 %**
 con la incorporación de **10-12** nuevos países

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.

21. Al mismo tiempo, el avance de los diez Estados Miembros que se inician en el desarrollo de sus programas nucleoelectricos basados en centrales nucleares evolutivas indica que sigue habiendo interés en la tecnología de las centrales nucleares a gran escala. Los Estados Miembros están notificando que pretenden utilizar el diseño de referencia para la explotación y sacar provecho de la experiencia adquirida por los reguladores y explotadores del país de origen.

22. Con independencia de que un programa se base en centrales nucleares de grandes dimensiones o en SMR, conviene abordar correctamente las cuestiones relativas a la infraestructura nucleoelectrica nacional, comprendidos los requisitos relativos a la seguridad tecnológica nuclear, la seguridad física nuclear y las salvaguardias.

A.4. Desarrollo de la tecnología nucleoelectrica

Situación

23. El desarrollo de la tecnología nucleoelectrica mundial se centra en acelerar el despliegue de reactores avanzados, incluidos los reactores innovadores como los SMR, así como en ampliar el uso de la energía nucleoelectrica a aplicaciones no eléctricas como la calefacción urbana, la producción de hidrógeno y la desalación. También existe un claro interés de las partes interesadas no tradicionales en utilizar la energía nucleoelectrica para descarbonizar el sector industrial, concretamente en actividades industriales que requieren una gran cantidad de energía. En algunas zonas del mundo, las partes interesadas están estudiando aplicaciones de la energía nucleoelectrica como las centrales nucleares flotantes para la generación combinada de calor y electricidad, los microrreactores para aplicaciones muy concretas (en regiones alejadas y pequeñas islas, en sustitución de generadores de diésel, etc.) y la energía nucleoelectrica para aplicaciones espaciales. Debido a la creciente penetración de las energías renovables variables, que generan tensión en las redes eléctricas, los reactores avanzados están cobrando impulso como solución limpia que proporciona flexibilidad a las redes eléctricas. Por último, con la llegada de potentes capacidades de computación y herramientas de análisis de datos, la industria nuclear está adoptando la inteligencia artificial (IA), en concreto el aprendizaje automático o *machine learning* (ML) y las técnicas de aprendizaje profundo o *deep learning* para renovar los sistemas de operación, así como los sistemas de mantenimiento a corto y largo plazo.

Tendencias

24. Además de los esfuerzos de los Estados Miembros en el desarrollo de tecnología de reactores avanzados, un número cada vez mayor de empresas privadas y de empresas emergentes o *start-ups* está desarrollando nuevos modelos de reactores que están atrayendo financiación tanto pública como privada. Esas empresas traen consigo modelos empresariales revolucionarios y metodologías innovadoras, como el uso de gemelos digitales, técnicas avanzadas de fabricación y técnicas de IA y ML para una amplia gama de actividades que podrían transformar el modo en que se diseñan, autorizan y operan los sistemas nucleares. La IA 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 IA 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 IA también puede aportar otros beneficios a la industria nuclear en términos de fiabilidad, seguridad y eficiencia general.

A.4.1. Reactores avanzados refrigerados por agua

Situación

25. Los reactores refrigerados por agua (WCR) siguen desempeñando un papel importante en la industria nuclear comercial, superan los 19 000 años-reactor de funcionamiento, y actualmente representan más del 95 % de todos los reactores de potencia civiles en funcionamiento en el mundo. Al final de 2022, 54 de los 57 reactores nucleares en construcción eran modelos refrigerados por agua ligera o pesada. En 2022, los avances más importantes en el sector de los WCR estuvieron relacionados con las conexiones a la red que han tenido lugar en China, los Emiratos Árabes Unidos, Finlandia, el Pakistán y la República de Corea.

Reactores refrigerados por agua



de todos los reactores de potencia
civiles en funcionamiento
en el mundo

26. En varios países también se están contemplando, estudiando e implementando, cada vez más, versiones avanzadas de WCR existentes para la utilización gradual de ciclos del combustible avanzados y más eficientes, cerrados total o parcialmente. Varios Estados Miembros siguen realizando actividades de investigación y desarrollo (I+D) en reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR). 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. En Europa se creó el concepto de reactor de agua ligera de alto rendimiento y, en colaboración con China, se planificó, diseñó y analizó una instalación de ensayo para la cualificación del combustible en el reactor. En la Federación

de Rusia, se están llevando a cabo estudios conceptuales sobre reactores de potencia innovadores refrigerados y moderados por agua a presión supercrítica, incluida la posibilidad de un núcleo de espectro rápido. Los diseños recientes se centran en versiones modulares pequeñas de los diseños de SCWR y hacen hincapié en la mejora de la seguridad tecnológica, la seguridad física, los aspectos económicos y la sostenibilidad.

27. Los Estados Miembros están centrando sus esfuerzos, de forma diligente, en el desarrollo de sistemas energéticos integrados que combinen las energías renovables —en particular la energía solar y la eólica, que son fuentes variables de energía— con las centrales nucleares para suministrar carga de base y mejorar la estabilidad de la red, así como para aplicaciones no eléctricas.

Tendencias

28. La producción eléctrica de los WCR avanzados en fase de construcción varía entre los 1000 y 1700 MW(e) por unidad y se está trabajando para obtener incrementos aún mayores en la fase de diseño de WCR evolutivos grandes. En los Estados Miembros continúa la tendencia a favor de los emplazamientos con varias unidades de un mismo tipo o de tipos diferentes de reactor. Unos 30 países que actualmente no cuentan con centrales nucleares en funcionamiento están contemplando la posibilidad de construir unidades de WCR grandes o pequeños.

29. La continua y creciente demanda de generación de electricidad segura, limpia, fiable y eficaz en relación con el costo supone un fuerte impulso para que los explotadores amplíen en varios decenios la vida operacional de las centrales nucleares mediante la modernización de las centrales y la mejora del equipo y los sistemas primordiales en apoyo de la explotación a largo plazo.

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

Situación

30. En 18 Estados Miembros hay más de 80 diseños de SMR de importantes líneas de tecnología en distintas etapas de desarrollo y despliegue. Durante los últimos tres años se han conseguido grandes logros con respecto al despliegue. La central nuclear flotante Akademik Lomonosov, en la Federación de Rusia, con dos módulos de PWR KLT-40S, se conectó a la red en diciembre de 2019 y su explotación comercial se inició en mayo de 2020, con la generación de 70 MW(e). En China, en un intento por materializar tecnología innovadora en relación con un reactor de muy alta temperatura, en diciembre de 2021 se conectó a la red el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) de demostración y alcanzó una plena potencia inicial de 210 MW(e) en diciembre de 2022.



diseños de SMR
En **18**
Estados Miembros

31. En Argentina, el reactor CAREM 25, basado en un PWR integrado con circulación natural, se encuentra en una fase avanzada de construcción y se prevé que alcance su primera criticidad en 2026. La construcción del reactor ACP100, que está previsto que sea un reactor multipropósito, se inició en julio de 2021 en China y se prevé el comienzo de su explotación comercial para finales de 2026. En Yakutia (Federación de Rusia) se está construyendo un SMR sobre la base del reactor RITM-200N; el proyecto ha recibido aprobación ambiental y se prevé que su explotación comercial comience en 2028. En agosto de 2022 comenzó en la Federación de Rusia la construcción de la primera central nuclear flotante sobre la base del reactor RITM-200 y en la Federación de Rusia se está desarrollando una unidad de potencia flotante optimizada basada en el reactor RITM-400. En los Estados Unidos de América, en julio de 2022, la Comisión Reguladora Nuclear aprobó un certificado de diseño para un diseño inicial de la Central NuScale Power. En diciembre de 2022 NuScale presentó una solicitud estándar de aprobación del diseño para la demostración de un módulo de potencia aumentada en una configuración de seis módulos en el Laboratorio Nacional de Idaho en 2029. Francia está desarrollando NUWARD, un diseño de PWR integrado para generar 340 MW(e) a partir de dos unidades de reactor independientes de 170 MW(e) cada una, de manera que posibilite un funcionamiento flexible. El primer hormigonado para un reactor NUWARD, el primero en su género, se realizará en Francia de aquí a 2030. NUWARD es un SMR de estudios de caso para un examen conjunto temprano de Europa dirigido por la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia, que cuenta con la participación de la Oficina Estatal de Seguridad Nuclear checa y la Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear de Finlandia. En el Reino Unido, la Oficina de Reglamentación Nuclear está llevando a cabo una evaluación genérica del diseño del SMR de Rolls-Royce, un PWR de tres bucles diseñado para generar 470 MW(e); el comienzo de su construcción está previsto para 2026. También existen diseños de SMR basados en tecnología de reactores de agua en ebullición con circulación natural. La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos y la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear están examinando una solicitud licencia para construir para el BWRX-300, un diseño de 300 MW(e) que se originó en los Estados Unidos de América y que está previsto que se utilice en la central nuclear de Darlington, en Ontario (Canadá) y en el emplazamiento de Clinch River

en Tennessee (Estados Unidos de América). En el plan de acción del Canadá para reactores modulares pequeños también se señala la intención de desplegar el microrreactor modular (MMR), un microrreactor con tecnología de reactores modulares de alta temperatura refrigerados por gas, a fin de generar 15 MW(t) para la cogeneración de electricidad y calor industrial en los laboratorios de Chalk River. En la República de Corea, el diseño del reactor modular avanzado integrado (SMART) de 110 MW(e) se encuentra en proceso de concesión de licencia para obtener una aprobación del diseño estándar conjunta en cooperación con la Arabia Saudita. Un consorcio coreano ha empezado a desarrollar un SMR innovador, un PWR de 170 MW(e), con miras a mejorar la seguridad y los aspectos económicos.

32. Los reactores de sales fundidas (MSR) también pertenecen a la línea tecnológica adoptada para los SMR. Actualmente se están realizando en el Canadá, China, Dinamarca, los Estados Unidos de América, Francia, Indonesia, el Japón, los Países Bajos y el Reino Unido diversos diseños de MSR en distintas fases de desarrollo.

Tendencias

33. El interés de los Estados Miembros en los SMR y sus aplicaciones ha ido en aumento. Se están haciendo importantes esfuerzos industriales y en materia de reglamentación para facilitar el desarrollo de diseños y un despliegue temprano. Las principales tendencias se siguen centrande en el campo de la tecnología con mayor nivel de madurez, particularmente en relación con los WCR y los MHTGR integrados. Hasta aproximadamente 2030, los diseños de SMR que utilicen estas tecnologías estarán a la cabeza de los procesos de concesión de licencias, seguidos por diseños de reactores innovadores que utilicen refrigerantes no basados en agua. En 2022, en el Canadá, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón, el Reino Unido y la República Checa continuaron las actividades de desarrollo de un subconjunto de SMR conocidos como microrreactores. Concebidos para generar un rango inferior de potencia de hasta 10 MW(e), los microrreactores se consideran la solución óptima para cogenerar calor y electricidad en regiones alejadas o islas pequeñas, y/o para sustituir los generadores diésel.

34. Otros países se están sumando al compromiso de desarrollar diseños de reactores instalados en plataformas marinas. La República de Corea sigue desarrollando BANDI-60, una unidad flotante de potencia basada en un PWR para generar 60 MW(e). En Dinamarca, una *start-up* dedicada al diseño de reactores está desarrollando el Compact Molten Salt Reactor (reactor compacto de sales fundidas) para producir aproximadamente 100 MW(e). Los SMR instalados en plataformas marinas están diseñados para mercados muy concretos, entre los que cabe mencionar el suministro de energía eléctrica y calor a comunidades remotas, la desalación y los sistemas energéticos híbridos mediante la colaboración con industrias marinas y de la construcción naval.

35. Ante este escenario de avances vertiginosos, la Plataforma del OIEA sobre SMR, constituida en 2021 por el Director General del OIEA, ofrece una “ventanilla única” para los Estados Miembros y otras partes interesadas en el desarrollo, el despliegue y la supervisión de los SMR; esta plataforma garantiza el apoyo coordinado y constante del Organismo, también a través del recién inaugurado Portal sobre SMR.

A.4.3. Reactores rápidos

Situación

36. En 2022, cinco reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR) estaban en funcionamiento en tres Estados Miembros: uno en China, uno en la India y tres en la Federación de Rusia. La India también está poniendo en servicio el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e), mientras que China está construyendo dos unidades de SFR del mismo tipo, el CFR-600. Si bien los cinco reactores en

funcionamiento y los tres reactores en fase de construcción están refrigerados por sodio líquido, la tecnología de refrigeración por metal líquido pesado resulta cada vez más atractiva, sobre todo en el ámbito de los SMR. La Federación de Rusia sigue construyendo un reactor rápido refrigerado por plomo (LFR) de 300 MW(e) de demostración: el BREST-OD-300 (figura A.3) y el reactor de investigación de neutrones rápido multipropósito. En varios países se encuentran también en fase de desarrollo varias otras tecnologías de refrigeración prometedoras, como de helio y sales fundidas. De los seis conceptos de reactores innovadores desarrollados por el Foro Internacional de la Generación IV, tres de ellos (refrigerados por sodio, metal líquido pesado y helio) son sistemas de neutrones rápidos, mientras que dos (refrigerados por sales fundidas y agua supercrítica) pueden funcionar bien en el espectro neutrónico rápido o en el moderado.



*Fig. A.3. Emplazamiento del BREST-OD-300 en septiembre de 2022
(fotografía: ROSATOM)*

Tendencias

37. Los SFR siguen siendo la principal opción para el despliegue a medio plazo: la Federación de Rusia está desarrollando el reactor de grandes dimensiones BN-1200 de 1200 MW(e); China está planificando el reactor CFR-1000 de 1 GW(e); y TerraPower, en los Estados Unidos de América, está desarrollando el reactor Natrium, combinado con almacenamiento de sales fundidas, que puede alcanzar un máximo de 500 MW(e). El reactor Natrium puede sustituir una central eléctrica convencional alimentada con carbón y también puede funcionar junto con otras energías renovables. Varios países están desarrollando reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR): los Estados Unidos de América y el Reino Unido están desarrollando el LFR de Westinghouse de 450 MW(e); Italia y Rumania, el Reactor Rápido Avanzado Europeo de Demostración Refrigerado por Plomo de 120 MW(e) (ALFRED); Suecia, el SEALER-55; y China, varios diseños de LFR de tipo SMR. Fundada a finales de 2021, la *start-up* Newcleo, constituida entre Italia y el Reino Unido, está desarrollando minireactores LFR (30 MW(e)) y LFR pequeños (200 MW(e)). Si bien Francia ha pospuesto el desarrollo del reactor avanzado refrigerado por sodio para demostración industrial, las actividades de I+D de SFR y el correspondiente ciclo del combustible continúan y este país está desarrollando un

reactor rápido de sales fundidas (MSFR) que puede funcionar en el ciclo del uranio-plutonio. La UE está llevando a cabo un proyecto sobre MSFR— SAMOSAFER destinado a desarrollar y demostrar nuevas barreras de seguridad para lograr un comportamiento más controlado en casos de accidente severo.

A.4.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica

Situación

38. La cogeneración de electricidad y calor para aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear es una tecnología fiable y demostrada que concita un creciente interés en todo el mundo y que tiene amplias perspectivas de mercado y un gran potencial de desarrollo, ya que hoy día solo se utiliza directamente una pequeña fracción del calor nuclear. Actualmente, un total de alrededor de 70 reactores nucleares se están utilizando para aplicaciones no eléctricas, clasificadas a grandes rasgos como de desalación, calefacción urbana, calefacción industrial y producción de hidrógeno. La utilización del calor nuclear en esas aplicaciones asciende en total a más de 2 TW·h de equivalente eléctrico cada año.

La mayor parte de esos reactores nucleares se utiliza para proporcionar calefacción urbana y aproximadamente la mitad de ellos también proporcionan calor industrial. Unos diez se utilizan actualmente para suministrar energía para la desalación nuclear, y unos cuantos están en proceso de iniciar las demostraciones a escala experimental de la producción de hidrógeno.

39. Sumándose a un grupo de usuarios existente del que forman parte Bulgaria, Eslovaquia, la Federación de Rusia, Hungría, la República Checa, Rumania, Suiza y Ucrania, China inició recientemente un gran programa de desarrollo de la calefacción urbana mediante energía nuclear. Tras la puesta en marcha en 2020 de la red de calefacción urbana conectada a la central nuclear de Haiyang, en la provincia de Shandong (China), el proyecto Hongyanhe, iniciado oficialmente en 2022, evitará las emisiones asociadas a 12 100 toneladas de carbón, y se reducirán las emisiones de azufre, dióxido de carbono, polvo, óxido de nitrógeno y ceniza. En la central nuclear de Qinshan, en la provincia de Zhejiang, en 2021 también se puso en marcha un proyecto de demostración de calefacción urbana con el objetivo de disponer, para 2025, de una superficie de cuatro millones de metros cuadrados dotados de calefacción por energía nuclear, que abarcará la principal zona urbana del condado de Haiyan y toda la zona de la ciudad de Shupu.

40. Algunos países tienen previsto utilizar la desalación nuclear, uniéndose a usuarios experimentados de esta tecnología. En el Japón y la Federación de Rusia, varias unidades de desalación han estado recibiendo energía eléctrica de centrales nucleares, y la India, que ya posee una larga experiencia en la explotación de unidades de desalación acopladas a reactores nucleares, tiene previsto ampliar en los próximos años su capacidad de desalación nuclear.

41. Varios países están estudiando la posibilidad de producir hidrógeno a partir de electricidad o del calor generado por los reactores nucleares, entre ellos el Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea y Suecia. Hay actividades de I+D en curso para acoplar procesos de producción de hidrógeno a alta temperatura con reactores avanzados (como el HTR-PM, que recientemente entró en funcionamiento en China), así como con el parque actual. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América hay cinco proyectos

Unos 70 reactores nucleares
se utilizan actualmente para
aplicaciones no eléctricas

Más de 2 TW·h
de equivalente eléctrico al año

diferentes de acoplamiento de electrolizadores con centrales nucleares existentes; cuatro de ellos comportan el acoplamiento eléctrico con electrolizadores a baja temperatura, y uno, en la central nuclear de Prairie Island, también utilizará el calor nuclear para aumentar la eficiencia de la producción de hidrógeno (figura A.4). La Federación de Rusia prevé demostrar la producción de hidrógeno limpio en la central nuclear de Kola, y Francia ha anunciado que espera iniciar, para 2030, la construcción de un reactor modular pequeño y utilizar el parque nuclear existente para producir hidrógeno limpio.

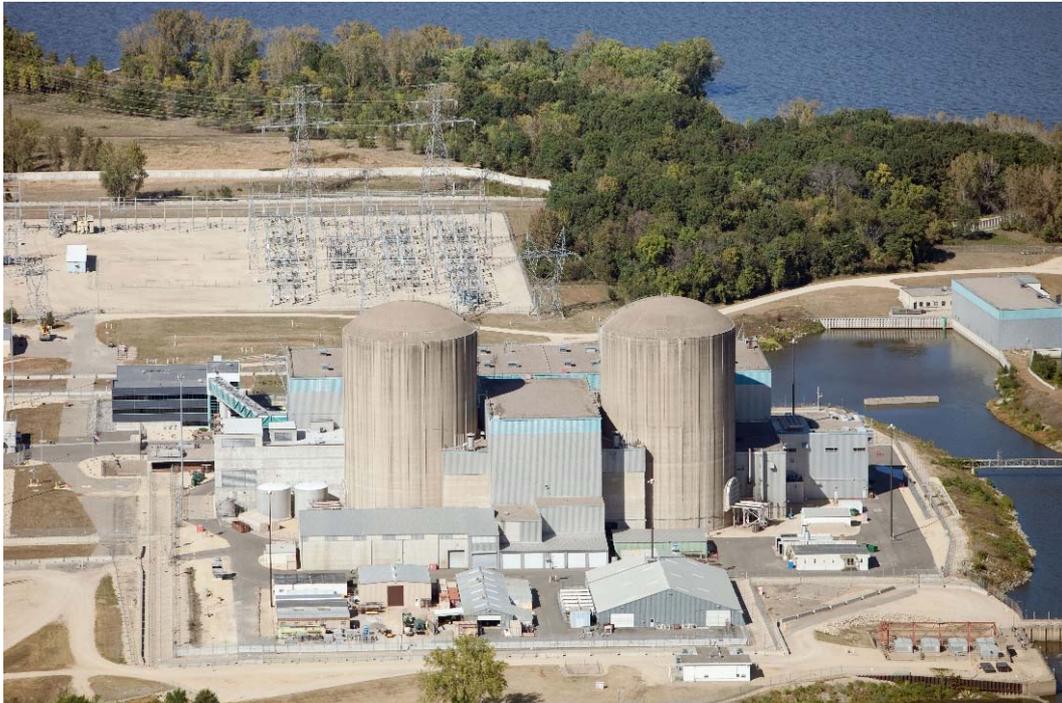


Fig. A.4. La central nuclear de Prairie Island, en Minnesota (Estados Unidos de América), donde Xcel Energy y sus socios están implementando un proyecto piloto sobre la generación de hidrógeno mediante un electrolizador de vapor a alta temperatura. (Fotografía: Shutterstock)

Tendencias

42. Las posibilidades de la energía nuclear de suministrar calor además de electricidad despiertan cada vez más interés en todo el mundo. Esto sucede en respuesta a los crecientes esfuerzos desplegados para luchar contra el cambio climático y conforme muchas regiones del mundo experimentan un aumento de los costos de los combustibles fósiles. Dado que la mayoría de las emisiones se originan actualmente fuera del sector eléctrico y que casi toda la energía para las aplicaciones no eléctricas se obtiene en la actualidad de combustibles fósiles, la energía nuclear reviste particular interés por ser una de las pocas fuentes tanto de electricidad como de calor que no genera emisiones de carbono, puede utilizarse a escala sin limitaciones geográficas y está disponible las 24 horas. Por otro lado, los SMR y los microrreactores ofrecen interesantes posibilidades debido a su menor tamaño, puesto que algunos de los centros de demanda de calor no son suficientemente grandes como para poder utilizar de manera eficaz la cantidad de calor que generan las centrales a escala de gigavatios. Por último, determinados reactores avanzados, como el HTR-PM, ofrecen posibilidades únicas asociadas al suministro de calor de alta temperatura, el cual puede a su vez usarse eficazmente en varias aplicaciones industriales.

B. Ciclo del combustible nuclear

B.1. Parte inicial

Situación

43. En el primer trimestre de 2022, el precio al contado del uranio rondaba los 52,00 dólares de los EE. UU. por libra de U_3O_8 . Se trata de un aumento importante con respecto al tercer trimestre de 2021, cuando la libra de U_3O_8 costaba unos 32,00 dólares de los EE. UU. Además, el precio al contado del uranio se ha incrementado alrededor del 42 % desde 2021 y más del 64 % en los dos últimos años (figura B.1). Este aumento sostenido del precio al contado del uranio ha revitalizado la industria de la producción de uranio, y varios productores primarios están intentando reanudar sus operaciones que, debido al bajo precio al contado, estaban en régimen de cuidado y mantenimiento. Ejemplos de esto son la mina de McArthur River, en el Canadá, y la mina Langer Heinrich, en Namibia.

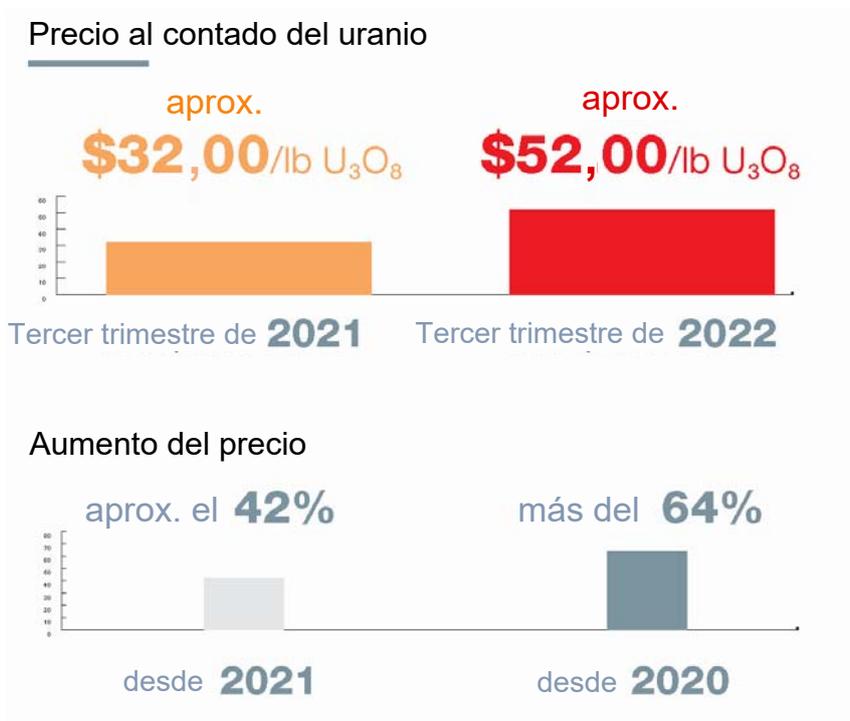




Fig. B.1. Evolución del precio al contado del uranio desde 2018. (Fuente: UxC)

44. Kazajistán, el país con las tasas anuales de producción de uranio más altas, ha anunciado que aumentará la producción de sus operaciones de recuperación *in situ* de alrededor del 70 % al 90 % de la capacidad nominal. La mina Honeymoon, en Australia, también ha anunciado la reanudación de las actividades en su mina de recuperación *in situ* y su instalación de procesamiento. La prospección de uranio alcanzó un mínimo en 2020, con un gasto de aproximadamente 39,2 millones de dólares de los EE.UU. Con las señales positivas en el mercado del uranio en los dos últimos años, la actividad de prospección está aumentando, y en 2021 se gastaron alrededor de 71 millones de dólares de los EE.UU. en la prospección de uranio.

45. La producción de combustible nuclear es una tecnología consolidada que ha mejorado constantemente con los años gracias a la automatización y la digitalización, la reducción de la cantidad de desechos generados por la explotación y la mejora de la protección radiológica de los trabajadores. Ha proporcionado mejoras en los aspectos económicos (ampliación de los ciclos del combustible de 12 meses a 18 y 24 meses, grados de quemado más elevados), la fiabilidad (disminución de los fallos del combustible, nuevos diseños de combustible para reducir al mínimo el arqueamiento de los conjuntos combustibles, mejor comportamiento sísmico, combustible dopado, revestimiento y vainas dúplex, mayor resistencia a la corrosión) y la sostenibilidad (el reciclaje y reciclaje múltiple del combustible para reactores de agua ligera (LWR) y reactores rápidos). Actualmente, la capacidad existente de fabricación de combustible nuclear es suficiente en todo el mundo para cubrir la demanda prevista de energía nucleoelectrónica.

46. Varios Estados Miembros —algunos de los cuales participan en el CPI del Organismo “Ensayo y simulación de combustibles de tecnología avanzada y combustibles tolerantes a accidentes”— tienen en curso programas de investigación, desarrollo y demostración (ID&D) para utilizar combustibles de tecnología avanzada y tolerantes a accidentes y combustibles innovadores, en los que emplean tecnologías de fabricación avanzadas, como la fabricación aditiva (p. ej. impresoras 3D para formar carburo de silicio de pureza nuclear que se utiliza en combustibles microencapsulados cerámicos).

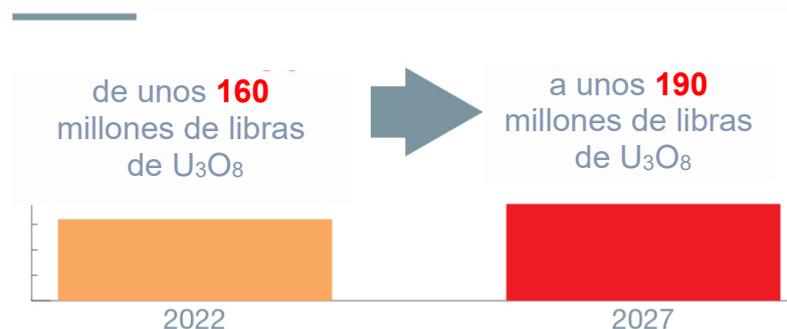
47. Varios Estados Miembros ya reciclan combustibles en reactores existentes y prevén hacer lo mismo en reactores futuros, mientras que otros tienen programas de ID&D en curso para reciclar combustible o desplegar combustibles innovadores para SMR. Hay en curso actividades de I+D sobre combustibles de

dióxido de uranio y combustibles de mezcla de óxidos (MOX) de uranio y plutonio y combustibles de tecnología avanzada y tolerantes a accidentes para SMR refrigerados por agua ligera o pesada; sobre el combustible de cermeto para SMR refrigerados por agua ligera, flotantes y de tierra firme; sobre combustibles TRISO para SMR de alta temperatura refrigerados por gas/sales fundidas/tubería de calor; sobre combustibles metálicos o cerámicos para SMR rápidos refrigerados por metal líquido/gas/tubería de calor, y sobre combustibles de sales fundidas para SMR refrigerados por sales fundidas.

Tendencias

48. Las previsiones mundiales indican que la demanda de uranio durante los próximos cinco años aumentará de alrededor de 160 millones de libras de U_3O_8 al año a alrededor de 190 millones de libras. Se prevé que en 2022 la tasa anual mundial de producción de uranio sea de alrededor de 133 millones de libras, con el resto de la oferta procedente de fuentes de suministro secundarias en

Previsiones mundiales de la demanda de uranio, por año



Se prevé que la tasa de producción anual mundial de uranio en 2022 sea de unos **133** millones de libras de U_3O_8 .

constante disminución. Con la expectativa de nuevos aumentos del precio al contado del uranio, se prevé que los departamentos de compras de las centrales nucleares intentarán adelantar la compra de concentrado de mineral de uranio y volver a preparar contratos a largo plazo con los proveedores de uranio. Posiblemente ello dé lugar a otro aumento del precio al contado del uranio, que para 2027 previsiblemente aumentará de alrededor de 52,00 dólares de los EE.UU. por libra de U_3O_8 a alrededor de 65,00 dólares de los EE.UU. por libra de U_3O_8 .

49. Se prevé que en los próximos cinco o diez años se abrirán nuevas minas de uranio en Australia, el Brasil, el Canadá, Mauritania y Namibia. No obstante, la producción prevista de estas nuevas explotaciones no será suficiente para cubrir el déficit de suministro que actualmente se suple con fuentes secundarias. Así pues, se prevé que la actividad de prospección de uranio se incrementará en los próximos años, tanto en yacimientos de tipo convencional como no convencional. Teniendo en cuenta el largo tiempo que lleva crear y poner en marcha una nueva mina de uranio una vez detectado y confirmado el yacimiento (entre 10 y 15 años), es necesario hacer prospecciones y detectar nuevas reservas de uranio.

50. Con miras a asegurar que los recursos de uranio se pongan en el mercado cuando se los necesita, los suministros de uranio futuros se beneficiarían de las oportunas actividades de investigación e innovación para seguir mejorando la prospección de uranio y desarrollar nuevas técnicas de extracción con una mejor relación costo-eficacia. Con respecto a la sostenibilidad de la industria del uranio y la recuperación de yacimientos de uranio de menor ley y más problemáticos, se necesita innovación para llegar a poner en producción yacimientos de uranio marginales. Un ejemplo de esa innovación en el sector de la extracción de uranio en 2022 pueden ser 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 a una discordancia. Además, el beneficio o mejora del uranio de baja ley es prometedor y está haciendo más atractivos los depósitos anteriormente poco económicos. Los métodos de biolixiviación son otra innovación importante que se está desarrollando para su aplicación en la lixiviación *in situ* de uranio procedente de yacimientos

asociados con areniscas. Por último, las técnicas de lixiviación en pila, utilizadas en otras aplicaciones mineras, se presentan prometedoras para algunas operaciones relacionadas con el uranio.

51. Tras el accidente nuclear de Fukushima Daiichi de 2011, muchos Estados Miembros han centrado sus esfuerzos en mejorar la seguridad de los combustibles utilizados en las flotas de reactores LWR a gran escala existentes y en los que se usarán en las futuras generaciones de reactores, como los SMR. Muchos Estados Miembros están aplicando programas intensivos para utilizar combustibles de tecnología avanzada y tolerantes a accidentes, que suponen la fabricación de barras de ensayo inicial y conjuntos de ensayo inicial, exámenes de irradiación y de posirradiación, la evaluación del comportamiento del combustible, la termohidráulica del sistema y el desarrollo y la validación de códigos de accidente severo.

52. Algunos Estados Miembros tienen previsto desarrollar una infraestructura de concesión de licencias para combustibles a fin de respaldar la ampliación del quemado y el enriquecimiento más allá de los límites históricos a mediados de la década de 2020, así como para posibilitar la explotación segura y económica en ciclos de 24 meses de los LWR existentes con quemado medio aumentado y sin cambios físicos en las plantas de fabricación y los contenedores de transporte (es decir, solo mediante modificaciones del procedimiento de concesión de licencias). Para satisfacer la demanda nacional y mundial se necesita una tendencia hacia la comercialización y las economías de escala para las tecnologías de combustibles avanzados por medio de volúmenes sostenibles.

53. Otros propulsores del desarrollo del combustible nuclear son los diseños de reactores innovadores, como los reactores de la Generación IV y los SMR (que van desde versiones a escala más reducida de los diseños de combustible para los LWR hasta diseños de combustible totalmente nuevos de la Generación IV). Los buenos resultados del uso de todos los tipos de combustible para los SMR dependerán de la madurez de las tecnologías de producción de combustible desde la etapa de I+D hasta la etapa de industrialización. Por otra parte, se necesitará uranio poco enriquecido de alta concentración para fabricar muchos de los conceptos de combustible nuclear innovadores, como algunos combustibles de tecnología avanzada y tolerantes a accidentes y combustibles para los SMR. En la actualidad, solo la Federación de Rusia posee una cadena de suministro para la producción de combustible de uranio poco enriquecido de alta concentración, aunque los Estados Unidos de América tienen previsto establecer una infraestructura de uranio poco enriquecido de alta concentración para reactores avanzados.

B.2. Parte final

Situación

54. El combustible nuclear gastado almacenado está acumulándose a un ritmo de aproximadamente 7000 toneladas de metal pesado (t HM) al año en todo el mundo, y el inventario almacenado ronda las 320 000 t HM. Para los países con programas nucleares establecidos desde hace tiempo que siguen estrategias de ciclo abierto, los principales retos siguen siendo la necesidad de capacidad adicional de almacenamiento de combustible nuclear gastado y la duración cada vez mayor del almacenamiento previo a la disposición final (figura B.2).



Fig. B.2. Participantes en el CPI del Organismo “Evaluación e investigación del comportamiento del combustible gastado, Fase IV” visitan, como parte del recorrido técnico por la central nuclear Atucha (Argentina) en 2019, la nueva instalación de almacenamiento que está construyéndose.

55. En algunos países el combustible nuclear gastado suele trasladarse de instalaciones de almacenamiento en húmedo a otras de almacenamiento en seco tras un tiempo de enfriamiento inicial. Se sigue trabajando en el desarrollo de instalaciones de almacenamiento provisional centralizado. El transporte de combustible nuclear gastado es una operación rutinaria en algunos países y, en otros, hay preparativos en marcha para respaldar futuras campañas de transporte. Los Estados Miembros siguen retirando y reubicando su combustible nuclear gastado en el marco de los proyectos de clausura de sus centrales nucleares.

56. El Reino Unido puso fin a sus operaciones de reprocesamiento en julio de 2022, con el cierre de la planta de reprocesamiento Magnox, lo que dio lugar a una importante reducción de la capacidad mundial de reprocesamiento. Prosigue en Francia, la India y la Federación de Rusia el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje para la flota actual y los combustibles para reactores avanzados a escala comercial. En diciembre de 2022, el reactor BN-800 de la Federación de Rusia se cargó casi en un 100 % con combustible MOX como medida para aplicar el concepto de “ciclo equilibrado del combustible nuclear”, que prevé el reprocesamiento del combustible gastado, el reciclaje de material nuclear regenerado como combustible nuclear y la transmutación de actínidos menores en reactores de neutrones rápidos. Se adoptó la decisión de construir el complejo energético experimental de demostración para el reprocesamiento de combustible para reactores rápidos refrigerados por plomo (LFR) en Seversk (Federación de Rusia), y se prevé que las operaciones comenzarán en 2024. A través de diversos programas del DOE de los Estados Unidos se está conectando a laboratorios nacionales con universidades y organizaciones comerciales con miras a desarrollar soluciones escalables basadas en tecnologías como el reprocesamiento acuoso y el piroprocesamiento. Terrestrial Energy, la empresa canadiense diseñadora del reactor integral de sales fundidas (IMSR), se ha asociado con la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) para determinar si el proceso de tratamiento Synroc de la ANSTO es adecuado para el acondicionamiento de las sales del combustible gastado del IMSR.

Tendencias

57. Conocer el comportamiento del combustible nuclear gastado en los distintos sistemas de almacenamiento y los mecanismos de envejecimiento y degradación de las estructuras, sistemas y componentes de almacenamiento sigue siendo fundamental para garantizar la posibilidad de seguir almacenando esos combustibles y transportándolos ulteriormente a las instalaciones de disposición final o a las plantas de reprocesamiento de combustible de forma segura. El avance en los programas de disposición final del combustible gastado en algunos Estados Miembros ha llevado aparejado un aumento de la cantidad de actividades de preparación, como el desarrollo de programas de caracterización.

58. El Organismo coordina las actividades de investigación sobre este tema para recopilar la experiencia operacional de los Estados Miembros y los resultados de las investigaciones, y para fomentar el intercambio de información. La continuidad de esos esfuerzos es especialmente importante habida cuenta de los mayores aumentos de eficiencia de los reactores que se han logrado mediante la producción de combustible gastado con grados de enriquecimiento inicial y de quemado más elevados, lo que dio lugar a aumentos de la potencia térmica de salida y posibles riesgos más altos de fragilización de la vaina que podrían afectar los pasos posteriores de la gestión del combustible gastado.

59. Se está contemplando la posibilidad de nuevos diseños de combustible, tanto para la flota de reactores existente como para los diseños de reactores avanzados, incluidos los SMR, que podrían dar lugar a comportamientos potencialmente diferentes durante la gestión del combustible gastado, por lo que será necesario buscar soluciones innovadoras para la gestión del combustible gastado a fin de que puedan utilizarse en el plazo oportuno.

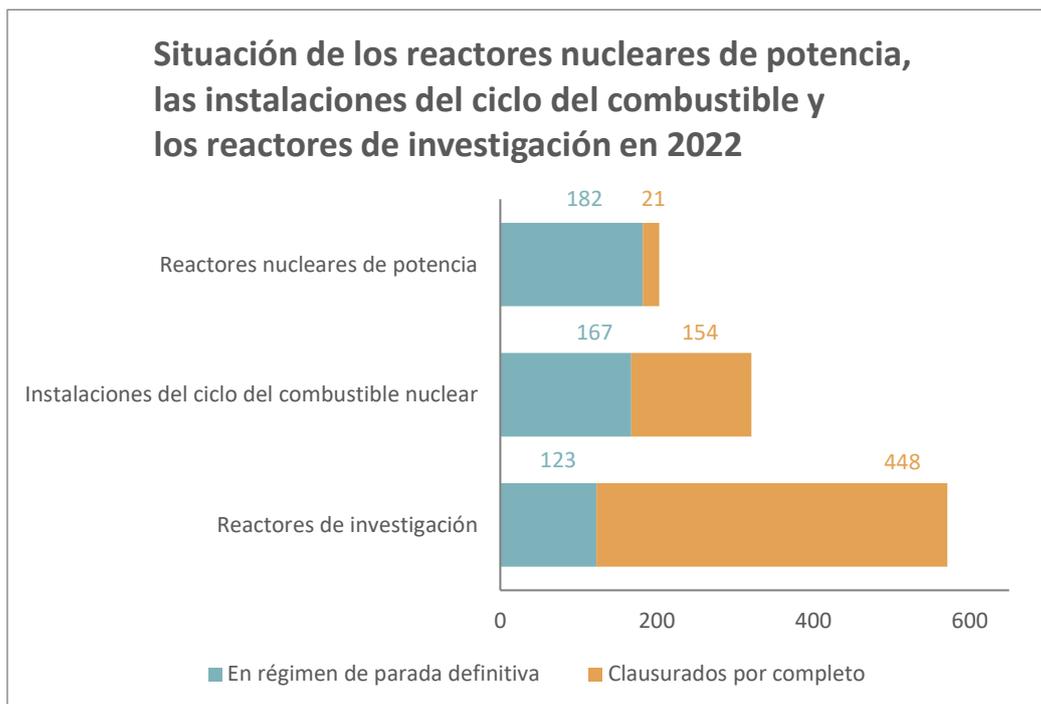
60. Pese a una disminución general de la capacidad mundial de reprocesamiento de combustible gastado, existe un creciente interés en el desarrollo de tecnologías avanzadas de reciclaje que puedan aplicarse a los combustibles actuales y contribuir al despliegue y la sostenibilidad de los reactores avanzados. Es importante integrar los ciclos del combustible nuevos e innovadores con los ciclos del combustible existentes, a fin de afrontar los actuales desafíos en materia de suministro de energía y garantizar el desarrollo sostenible, y tecnológica y físicamente seguro de la energía nucleoelectrónica.

C. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de desechos radiactivos

C.1. Clausura

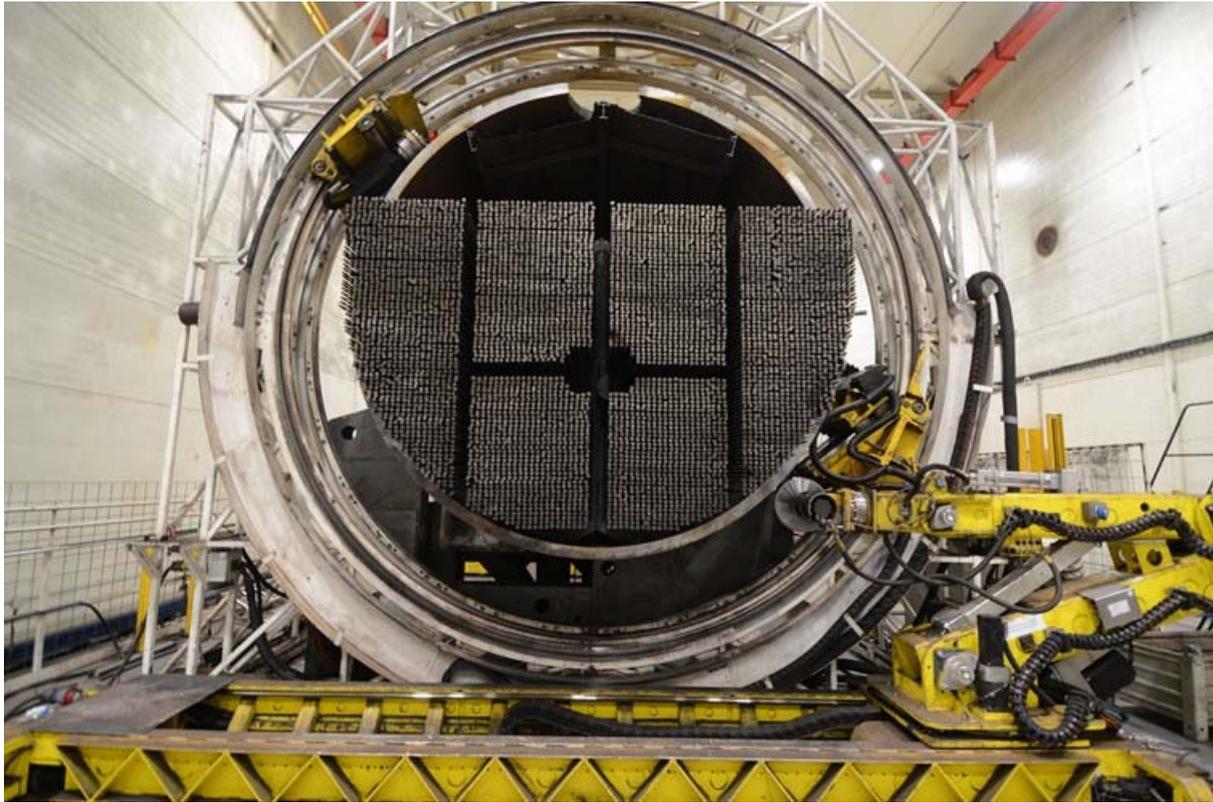
Situación

61. En 2022 se pusieron en régimen de parada definitiva cinco reactores de potencia: el Doel-3 en Bélgica, los reactores avanzados refrigerados por gas (AGR) Hinkley Point B-1 y B-2 y Hunterston B-2 en el Reino Unido y el PWR Palisades en los Estados Unidos de América. A escala mundial se han retirado permanentemente del servicio 203 reactores nucleares, 21 de los cuales se han clausurado por completo. Los principales programas de clausura de reactores de potencia en curso corresponden a Alemania, que tiene 27 reactores en régimen de parada definitiva o en fase de clausura; al Japón, que tiene 24 reactores en esas mismas fases, y a los Estados Unidos de América, en donde hay 28 reactores en régimen de parada definitiva o en fase de clausura, de los cuales 18 están en confinamiento seguro y 8, en proceso de desmantelamiento. El Reino Unido ha puesto en régimen de parada definitiva 36 de sus reactores refrigerados por gas de primera y segunda generación, la mayoría de los cuales se encuentran en la fase posterior a la explotación y están siendo preparados para pasar al confinamiento seguro.



62. Se están llevando a cabo actividades de clausura en los principales emplazamientos de instalaciones del ciclo del combustible en todo el mundo, incluidos varios emplazamientos en los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y el Reino Unido. En general, uno de los principales focos de atención en la actualidad es la reducción del riesgo de peligros graves, como la eliminación de los desechos históricos, que suelen almacenarse en piscinas o en zanjas de hormigón como paso previo al desmantelamiento de las instalaciones. En la planta de reprocesamiento Magnox, en el Reino Unido, están en marcha los preparativos para las actividades de limpieza posteriores a la explotación. El emplazamiento también está entrando en la modalidad de recuperación operativa completa de sus piscinas y silos históricos. En el emplazamiento de La Hague, en Francia, se sigue trabajando en la retirada y el acondicionamiento de los desechos históricos, incluida la retirada de los desechos de grafito y magnesio almacenados en silos de hormigón y la descontaminación de las celdas en las que los niveles de actividad limitan o impiden el acceso humano. También se han terminado de desmantelar todas las cajas de guantes de este emplazamiento utilizadas para manipular plutonio, y la atención se centra actualmente en el desmantelamiento de todos los equipos de proceso principales: recipientes de lixiviación, mezcladores-sedimentadores y evaporadores.

63. En 2022 se realizaron importantes avances técnicos en varias centrales nucleares; por ejemplo, la segmentación y el embalaje de 2 vasijas de presión del reactor, 12 generadores de vapor y otros componentes del circuito primario en la central nuclear Bohunice V-1 de Eslovaquia (figura C.1); se terminó de segmentar el gran tapón giratorio en la central nuclear Superphénix de Francia; se terminó el desmantelamiento del núcleo del reactor en la central nuclear Vermont Yankee de los Estados Unidos de América, y se finalizó la demolición del último gran edificio que quedaba, el edificio de turbinas, en la central nuclear José Cabrera de España.



*Fig. C.1. Segmentación del generador de vapor de la central nuclear de Bohunice V-1
(fotografía: Empresa de Actividades Nucleares y de Clausura, Eslovaquia)*

64. Se alcanzó un hito importante en el marco del programa de la parte final del Organismo de Energía Atómica del Japón con la finalización satisfactoria de las partes principales de la primera fase de la clausura del reactor reproductor rápido MONJU; en octubre de 2022 se trasladaron a la piscina de combustible gastado 530 conjuntos combustibles del núcleo del reactor y el tanque de almacenamiento de combustible fuera de la vasija. En abril de 2022 se terminó de retirar el sodio a granel del circuito primario de refrigeración.

65. El 22 de julio de 2022, la Autoridad de Reglamentación Nuclear del Japón aprobó la enmienda del plan de ejecución relativo al establecimiento de la instalación de descarga de agua tratada mediante el Sistema Avanzado de Procesamiento de Líquidos (ALPS), presentada en diciembre de 2021 por la Compañía Eléctrica de Tokio. Está previsto iniciar la descarga en 2023 y actualmente se están construyendo las instalaciones para llevarla a cabo. En relación con la recuperación de los restos de combustible de las vasijas de los reactores, se ha decidido que primero se llevará a cabo una recuperación de prueba en la Unidad 2. Se ha terminado de fabricar el equipo para este fin, como brazos robóticos y manipuladores (figura C.2), y actualmente se trabaja en la mejora de su operatividad y en una investigación minuciosa de la zona de penetración de la vasija de contención donde se instalarán los equipos.

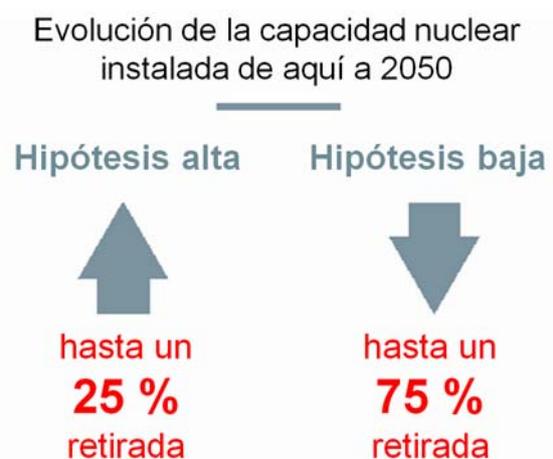


Fig. C.2. Sala de ensayo de los brazos robóticos y manipuladores para la central nuclear de Fukushima Daiichi (fotografía: Ministerio de Economía, Comercio e Industria del Japón)

Tendencias

66. Las proyecciones actuales del Organismo en relación con la evolución de la capacidad nuclear instalada de aquí a 2050 se presentan como hipótesis “alta” y “baja”. En el caso de la hipótesis alta, se retiraría aproximadamente el 25 % de la capacidad nuclear instalada actualmente y se prolongaría la vida útil de muchos otros reactores, junto con un amplio programa de nuevas construcciones. En cuanto a la hipótesis baja, se retiraría hasta el 75 % de la capacidad nuclear instalada actualmente, que se sustituiría con nuevas construcciones. Por lo tanto, existe un amplio margen de incertidumbre respecto al ritmo de las paradas de aquí a 2050.

67. Al igual que en los últimos años, el número de instalaciones nucleares que se someten a régimen de parada sigue un ritmo aproximadamente equiparable a la velocidad con que se ponen en servicio nuevas instalaciones. En el caso de las centrales nucleares, domina las paradas la retirada de la segunda generación de reactores AGR del Reino Unido por razones económicas, ya que los costos asociados a la prolongación de la vida útil de las instalaciones no justifican el flujo de ingresos previsto de la continuidad de su funcionamiento. En el



caso de Alemania, debido a la actual crisis energética se ha retrasado de finales de 2022 a abril de 2023 la parada definitiva a que se iban a someter las tres últimas instalaciones en funcionamiento.

68. A pesar de la incertidumbre en torno al futuro ritmo de la parada de instalaciones, el número de instalaciones sometidas a desmantelamiento activo sigue aumentando, con una tendencia al desmantelamiento temprano de las instalaciones tras la parada definitiva. Entre los factores que influyen en esta tendencia cabe mencionar la política gubernamental, el deseo de los propietarios de las instalaciones de reducir al mínimo los costos asociados al mantenimiento de las instalaciones durante largos períodos y la incertidumbre en torno al costo final del desmantelamiento y la gestión de los materiales conexos.

69. Las tecnologías digitales y la realidad virtual y aumentada tienen cada vez más importancia en el avance de los proyectos de clausura de instalaciones nucleares, pues permiten una mejor planificación y ejecución. Los posibles beneficios abarcan varias esferas de actividad en la fase de clausura del ciclo de vida de la instalación: proporcionan mejores medios de recopilación, análisis y visualización de la información necesaria para planificar las estrategias de desmantelamiento; utilizan robots para garantizar la seguridad del personal; facilitan la capacitación de los operadores al permitir la simulación de las actividades previstas en un entorno virtual con efectos realistas; apoyan la definición exacta de los desechos que se generarán y, con ello, mejoran la estimación de los costos; y permiten una mejor visualización de los escenarios de clausura, tanto por parte de los operadores como de las partes interesadas externas. Las tecnologías digitales aportarán muchos beneficios potenciales más a toda la industria nuclear cuando los conocimientos adquiridos en la fase de clausura se transfieran a los diseñadores y explotadores de centrales nucleares, así como a las organizaciones de apoyo técnico.

C.2. Rehabilitación ambiental y gestión del material radiactivo natural

Rehabilitación ambiental

70. La rehabilitación ambiental puede ser un proceso lento y, en algunos casos, el avance es constante. En otros, sin embargo, los obstáculos para su ejecución siguen siendo un desafío. En los Estados Unidos de América desde 1989 la Oficina de Gestión Ambiental del Departamento de Energía ha finalizado la limpieza de 92 antiguos emplazamientos en todo el país, siendo el de Brookhaven National Laboratory el más recientemente terminado. Aún quedan 15 emplazamientos, que suponen algunas de las tareas más complejas y más onerosas. Avanzan los esfuerzos por superar el legado que ha dejado la extracción de uranio en Europa y Asia Central. Se ha desarrollado una tecnología emergente que combina un dron con un detector de rayos gamma de alta sensibilidad, que se desplegará en el futuro próximo para ayudar en la caracterización de emplazamientos contaminados por antiguas operaciones con uranio en Asia Central. Para responder a la necesidad de trabajadores especializados tanto en la clausura como en la rehabilitación, un consorcio dirigido por la Universidad de Oporto (Portugal) está desarrollando un programa de maestría en ciencias sobre clausura y rehabilitación ambiental bajo los auspicios del programa Erasmus+ de la Comisión Europea.

Gestión del material radiactivo natural

71. Numerosos países se enfrentan a desafíos relacionados con la gestión de sus residuos de material radiactivo natural (NORM) (figura C.3). Se está buscando apoyo para establecer la infraestructura necesaria que les permita satisfacer sus necesidades, pero se forman cuellos de botella debido a la ausencia de políticas sobre el uso de los residuos NORM y sobre las opciones de disposición final de los NORM cuando se consideran desechos. La falta de laboratorios acreditados en muchos Estados Miembros es otro obstáculo que se suma a las dificultades relacionadas con el transporte de estos materiales para su disposición final en otro país.



Fig. C.3. Residuos de la industria minera del cobre con presencia de NORM

Tendencias

Rehabilitación ambiental

72. En la esfera de la rehabilitación se observa una nueva tendencia que consiste en ampliar el concepto de reducción de daños de modo que incluya la adición de valor para un emplazamiento contaminado. El reprocesamiento de los desechos de mayor antigüedad existentes permite eliminar la costosa rehabilitación gracias a la estabilización geoquímica y geotécnica de los residuos. Esto disminuirá las responsabilidades y los costos de cierre final conexos y podría crear productos “verdes” comercializables. La rehabilitación es una fase crítica de las operaciones mineras en el marco de una economía circular, ya que ofrece la posibilidad de regenerar el emplazamiento para futuros fines

productivos. Un ejemplo de ello es un programa puesto en marcha en los Estados Unidos de América que destina una cantidad importante de recursos al desarrollo de energía limpia en antiguos terrenos mineros, de forma que estos emplazamientos se convierten en centros de energía limpia.

73. En el caso de los proyectos actuales y futuros, es fundamental empezar a planificar el cierre al inicio del proyecto. Sin embargo, para aprovechar plenamente estas oportunidades a nivel del emplazamiento es necesario un modelo de economía circular más amplio que tenga en cuenta los enfoques de sostenibilidad establecidos, que deberían incluir la dimensión ambiental, económica y social en el marco de un proceso participativo de toma de decisiones. En este sentido, existe una tendencia a la adopción de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático como apoyo a la toma de decisiones en situaciones complejas, como el ámbito de la rehabilitación ambiental.

Gestión del material radiactivo natural

74. La circularidad está también presente en las actividades relacionadas con la gestión de los NORM. Diferentes industrias están estudiando los procesos que pueden añadir valor a los residuos NORM. Prueba de una tendencia al alza en este sentido podrían ser, entre otras, el uso del fosfoyeso en la agricultura como enmienda del suelo y como material de construcción y el uso del lodo de ilmenita en la fabricación comercial de cemento y cerámica. Aprovechar al máximo los residuos generados en los procesos industriales relacionados con los NORM requerirá invertir en innovación tecnológica, políticas adecuadas a nivel nacional, conocimiento del inventario de dichos materiales y mecanismos de financiación innovadores, de modo que se pueda lograr la armonización con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

C.3. Gestión de desechos radiactivos

Situación

75. En 2022 siguieron registrándose importantes avances en la gestión de los desechos radiactivos, especialmente en relación con los programas de repositorios geológicos profundos y la continuación del despliegue seguro de tecnologías de gestión previa a la disposición final.

76. Aunque existen y se utilizan tecnologías para el acondicionamiento y el tratamiento de la gran mayoría de los flujos de desechos radiactivos, es difícil determinar cuáles son las técnicas más adecuadas desde el punto de vista técnico y de financiación. Para seleccionar la tecnología es necesario conocer los desechos y sus características, los criterios de aceptación de desechos aplicables y los requisitos reglamentarios correspondientes. La Comisión de Energía Atómica del Pakistán ha desarrollado capacidades de caracterización de desechos de las centrales nucleares y de desechos derivados de la clausura. Además del desarrollo de las capacidades de caracterización, se está avanzando en la formulación de criterios de aceptación de desechos para instalaciones de disposición final de desechos de actividad baja e intermedia (LILW). En varios países con inventarios pequeños se están ideando soluciones centralizadas para la gestión previa a la disposición final. Croacia ha decidido establecer un centro de gestión de desechos radiactivos en Čerkezovac y Estonia ha clausurado la instalación de tipo RADON y ha transferido todos los desechos a las instalaciones del emplazamiento de Paldiski.

77. Tras un programa exhaustivo para garantizar unas condiciones operativas seguras, se han reanudado las actividades de procesamiento y disposición final de desechos radiactivos en el emplazamiento de Chornóbil, en Ucrania, después de que estas instalaciones dejaran de funcionar en febrero de 2022.

78. Por conducto de la Iniciativa Mundial de Gestión del Radio 226 del Organismo, varios Estados Miembros ya han encontrado una salida para las fuentes de radio en desuso. En Islandia se han acondicionado fuentes de radio 226 para facilitar su transporte a fin de reciclarlas en forma de radiofármacos para tratar células cancerosas con partículas alfa dirigidas (figura C.4).

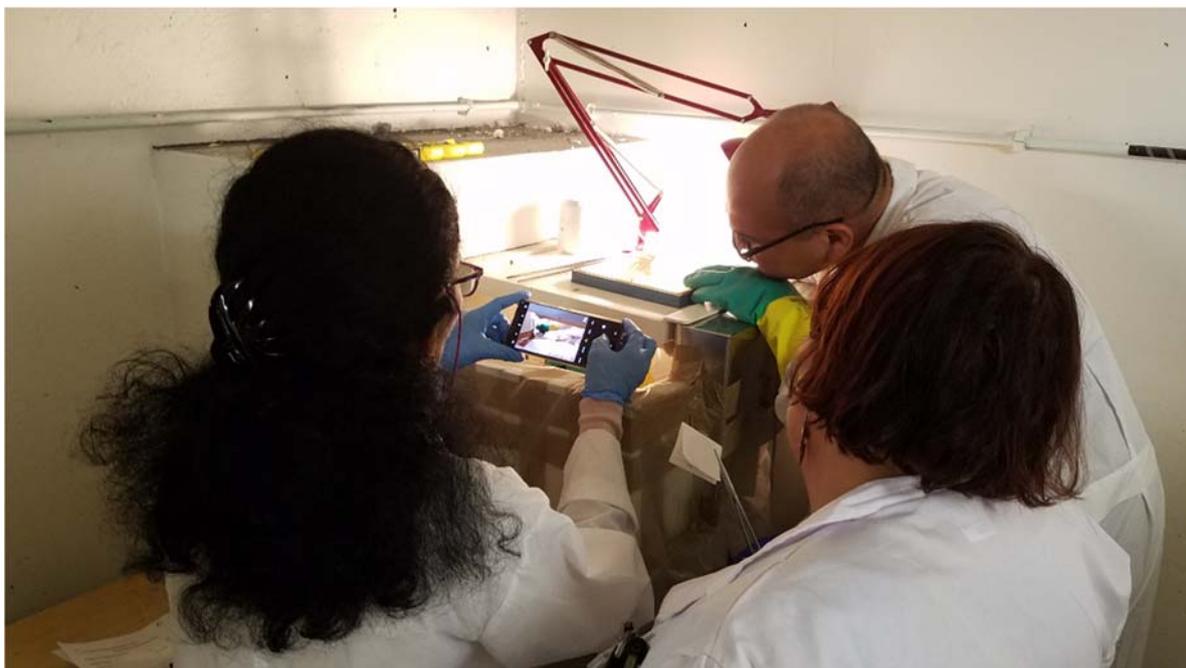


Fig. C.4. Agujas de radio usadas acondicionadas en Islandia para su reciclaje

79. En 2020 el Canadá puso en marcha un proceso inclusivo de participación para modernizar su política sobre desechos radiactivos y, en febrero de 2022, publicó su proyecto de política para los desechos radiactivos y la clausura con el fin de someterlo a consulta pública. En agosto de 2022 también se sometió a consulta pública una estrategia nacional integrada para la estrategia de gestión de desechos radiactivos del Canadá, centrada en la gestión fundamentada de los desechos y en la que todos los flujos de desechos del inventario nacional tienen prevista una solución de disposición final. Los Laboratorios Nucleares Canadienses anunciaron en mayo de 2022 que el proyecto Port Granby estaba en mantenimiento y monitorización a largo plazo tras la colocación de 1,3 millones de toneladas de desechos de actividad baja en un montículo de contención artificial en superficie que se había cerrado a finales de 2021.

80. Ha habido varios avances en los programas de repositorios geológicos profundos para desechos de actividad alta. La organización finlandesa de gestión de desechos Posiva terminó de excavar los cinco primeros túneles de disposición final en preparación para el inicio en 2025 de la disposición final de combustible gastado. En enero de 2022, el Gobierno sueco concedió permiso a la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares para empezar a construir el repositorio de combustible gastado de Forsmark, así como la planta de encapsulamiento de Oskarshamn. Una encuesta de opinión pública realizada posteriormente en el término municipal de Östhammar reveló que más del 80 % de los encuestados estaban a favor de la construcción del repositorio geológico profundo, la tasa de aprobación más alta hasta la fecha. En el marco del proyecto Cigeo, en Francia, estaba previsto solicitar una licencia de construcción antes de finales de 2022. En la Federación de Rusia se prevé que los estudios de laboratorio y a gran escala sobre el macizo rocoso para la construcción de un laboratorio de repositorio geológico profundo en la región de Krasnoyarsk finalizarán en 2023.

81. En cuanto a la selección del emplazamiento para un repositorio geológico profundo, en septiembre de 2022 la Cooperativa Nacional para la Disposición Final de Desechos Radiactivos de Suiza recomendó un emplazamiento para Nördlich Lägern y en 2024 presentará la solicitud de licencia. La Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares del Canadá sigue colaborando con comunidades de voluntarios y tiene previsto recomendar un emplazamiento para albergar un repositorio geológico profundo en 2024.

Tendencias

82. En muchos Estados Miembros se siguen iniciando y perfeccionando políticas y estrategias nacionales de gestión de desechos radiactivos. En el caso de los Estados miembros de la UE, esta labor está en consonancia con el requisito de cumplimiento de las obligaciones en virtud del artículo 14.3 de la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo de 19 de julio de 2011.

83. Se ha registrado un aumento en la devolución de fuentes de actividad alta en desuso a los proveedores para su reciclaje y disposición final. En 2023 se prevé retirar más de 30 fuentes de actividad alta en casi una docena de Estados Miembros. 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 finalizar en 2023 la primera disposición final de DSRS en pozos barrenados. Este proyecto se sigue con gran interés en muchos Estados Miembros cuyos inventarios se componen principalmente de DSRS. Bulgaria, Georgia y Ghana, entre otros países, están considerando esta tecnología de disposición final.

84. La reducción al mínimo de los desechos radiactivos sigue siendo una prioridad. Las tecnologías térmicas y la supercompactación siguen siendo la norma industrial a escala mundial para lograr reducir significativamente el volumen de LILW sólidos. Actualmente en los Estados Miembros se estudia exhaustivamente el uso de geopolímeros como alternativa al cemento Portland común. En Francia, Électricité de France y Veolia han creado una empresa conjunta, Waste2Glass, para procesar los desechos distintos de los desechos de actividad alta y transformarlos en cuerpos de desechos vítreos duraderos. En el Reino Unido, el complejo de investigación de Harwell se ha asociado con Augean, una empresa de gestión de desechos peligrosos, con el objetivo de adaptar una tecnología de chorro de agua a presión ultraalta para descontaminar las tuberías del complejo de investigación, lo que permitirá reciclarlas en lugar de someterlas a disposición final como desechos radiactivos.

85. Se sigue avanzando en la gestión de los inventarios de desechos históricos. En el emplazamiento de Hanford, en los Estados Unidos de América, se han empezado a tratar por primera vez a gran escala los desechos radioquímicos. Desde la década de 1950 se ha generado mucho más de 50 millones de galones de desechos, que actualmente se encuentran almacenados en tanques de almacenamiento subterráneos a la espera de su disposición final. Los Países Bajos están construyendo una nueva instalación multifuncional con edificios de almacenamiento para desechos radiactivos históricos procedentes de la producción de isótopos de uso médico, que proporcionará capacidad de almacenamiento hasta 2050. En el Reino Unido se ha empezado a ejecutar un programa de 20 años de duración para pasar los desechos de virutas de magnesio procedentes del procesamiento del combustible Magnox de silos de seis metros de profundidad a contenedores de desechos de acero inoxidable contruidos específicamente para trasladarlos a una instalación de almacenamiento moderna.

86. En cuanto a la colaboración internacional en el ámbito de la gestión de desechos radiactivos, se firmó un memorando de cooperación entre ČEZ, de la República Checa, y la Empresa de Actividades Nucleares y de Clausura, de Eslovaquia, para intercambiar conocimientos especializados en minimización de desechos y gestión del envejecimiento. La Association for Multinational Radioactive Waste Solutions ERDO prosiguió sus esfuerzos por encontrar soluciones multinacionales para los Estados Miembros con inventarios pequeños de LILW de período largo. El Programa Conjunto Europeo de Gestión de Residuos Radiactivos siguió haciendo intervenir a los participantes en el fomento de la colaboración encaminada a la gestión segura de los desechos radiactivos. La Plataforma Tecnológica para el Almacenamiento Definitivo Geológico de Residuos Radiactivos de la Unión Europea sigue trabajando activamente para hacer realidad su informe sobre la visión estratégica que permitiría en 2025 tener funcionando en Europa en condiciones de seguridad las primeras instalaciones de disposición final geológica de combustible gastado, desechos de actividad alta y otros desechos radiactivos de período largo.

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

Situación

87. El proyecto ITER avanzó a buen ritmo (figura D.1). En junio de 2022 el proyecto alcanzó el hito de haberse completado en un 77 %. El subconjunto del primer sector de la cámara de vacío, que incorpora dos bobinas de campo toroidal asociadas y elementos de blindaje térmico, está terminado e instalado en el foso del tokamak, y el tercer sector de la cámara de vacío ya ha sido entregado en el emplazamiento del ITER. Ahora que la tapa superior del criostato está acabada, todos los elementos de este se pueden dar por terminados. Se ha avanzado principalmente en los sistemas de planta: el sistema de agua de refrigeración se ha recibido y está listo para la puesta en servicio; la construcción de la planta de criogenia ha finalizado y ahora están realizándose los ensayos funcionales, y en los edificios de conversión magnética se ha instalado el 100 % del equipo necesario para el primer plasma. Por otra parte, resultados recientes obtenidos del análisis de componentes clave del ITER que son los primeros de su tipo indicaron la necesidad de realizar considerables reparaciones. Además, la Organización ITER ha estado estudiando cuestiones de reglamentación planteadas por la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia.

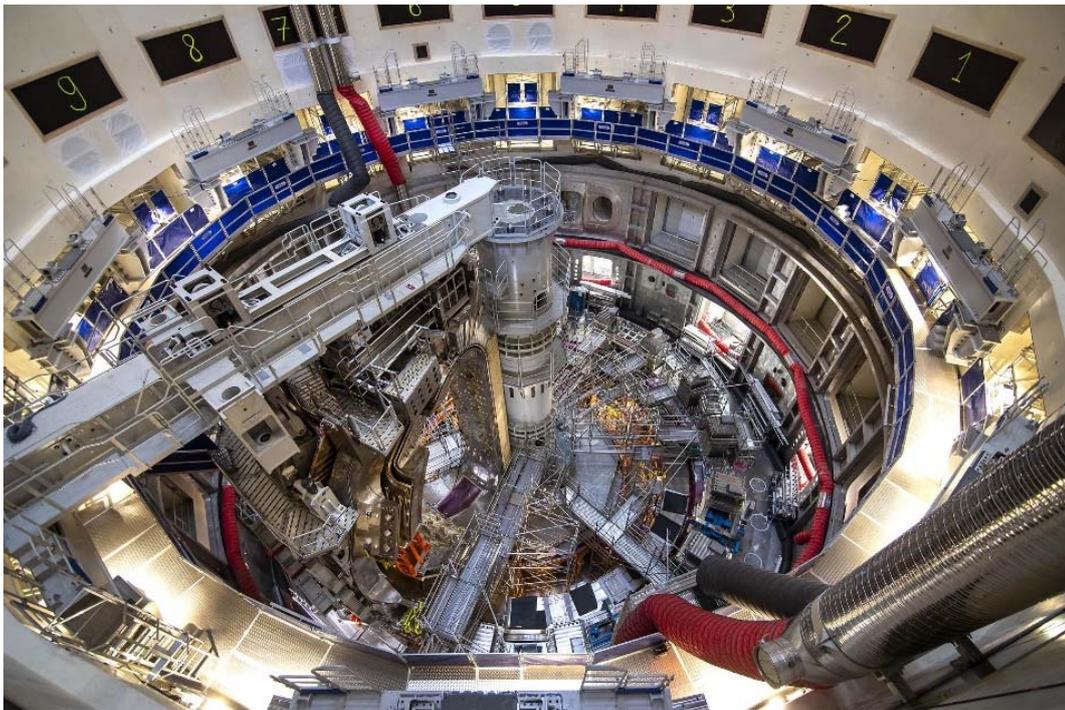


Fig. D.1. En el corazón del edificio del tokamak del ITER. Este foso de 30 metros de profundidad es el escenario donde se ensambla la maquinaria del ITER. El ensamblaje avanza desde abajo hacia arriba. (Fotografía: Organización ITER)

88. Prosiguieron los trabajos encaminados a establecer el consorcio que se encargará de la construcción, en España, del proyecto Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF)-DEMO Oriented Neutron Source (IFMIF-DONES), una instalación crucial para el desarrollo y la validación de materiales de fusión. La planificación del proyecto ha finalizado y se está procurando la financiación para cubrir los costos de construcción. Del mismo modo, en el Japón, el proyecto IFMIF-Engineering Validation and Engineering Design Activities siguió avanzando en la integración del diseño de ingeniería de IFMIF y en la recopilación de los datos necesarios para adoptar decisiones sobre la construcción, el

funcionamiento, la explotación y la clausura de la futura fuente de neutrones de fusión con la finalización de las actividades de validación de ingeniería de sus tres instalaciones principales: la instalación de ensayo, la instalación del blanco de litio y la instalación del acelerador.

89. La puesta en servicio del tokamak JT-60SA en el Japón, que comenzó en abril de 2020, fue interrumpida debido a la insuficiente capacidad de aislamiento de tensión de una de las bobinas magnéticas. Se está trabajando en la mejora de la capacidad de aislamiento y se prevé recomenzar la puesta en servicio a fines de 2023.

90. En octubre de 2022, el estelarator Wendelstein 7-X (W7-X) —el más avanzado del mundo, situado en Alemania— entró en su segunda fase experimental (figura D.2.). El W7-X está ahora completamente equipado con un conjunto refrigerado por agua de componentes expuestos al plasma, lo que permite descargas de hasta 30 minutos a 10 MW de calor, lo cual debería posibilitar el funcionamiento continuo.

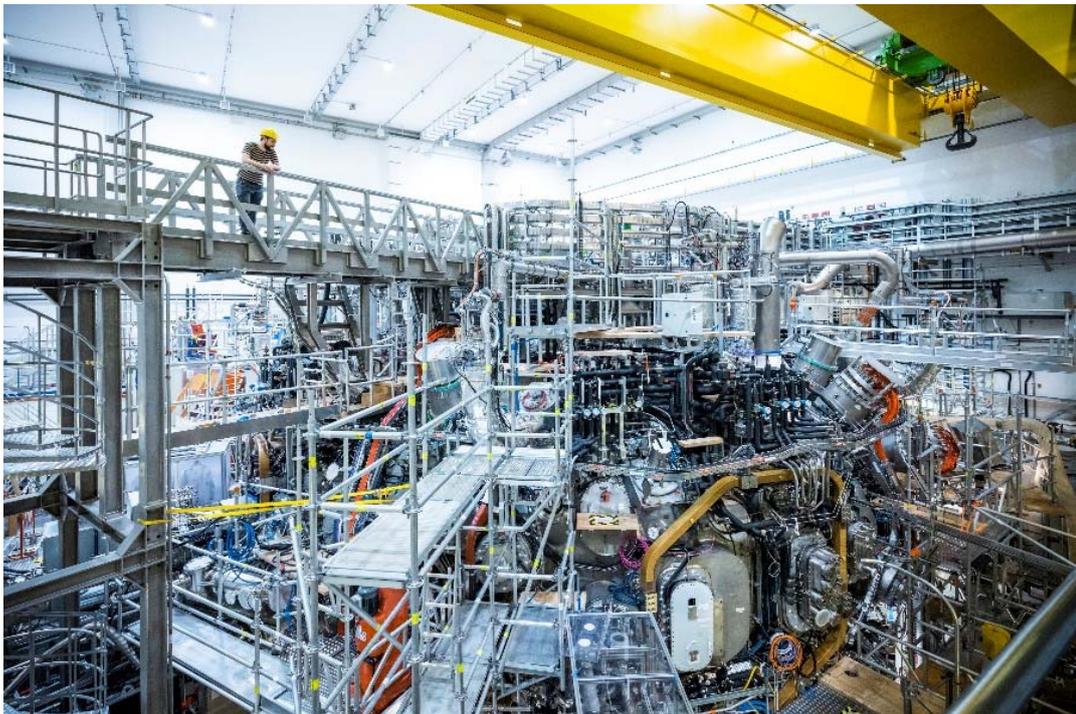


Fig. D.2. Con el doble de capacidad de calor, 40 medios de diagnóstico nuevos y 6,8 kilómetros de tuberías de refrigeración, el estelarator W7-X ha comenzado su segunda campaña experimental científica. (Fotografía: Instituto Max Planck de Física del Plasma)

91. En la República de Corea, según se informaba en un estudio¹ publicado en septiembre de 2022, los experimentos en la instalación del tokamak superconductor avanzado de investigación de Corea (KSTAR) habían producido un régimen de fusión de plasma que se ajustaba a los requisitos de funcionamiento de la central, como una alta temperatura de más de 100 millones de grados Kelvin y suficiente control de inestabilidades para garantizar el funcionamiento en régimen estable durante decenas de segundos. Esos resultados aumentaron la confianza en el diseño del tokamak como una prometedora senda hacia las centrales de energía de fusión a escala comercial.

¹ Han, H., Park, S.J., Sung, C. et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions. *Nature* 609, 269–275 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05008-1>.

92. El 13 de diciembre de 2022, el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció que se había logrado un avance científico histórico para la energía de fusión. Un equipo de investigación de la Instalación Nacional de Ignición (NIF), que se encuentra en Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL), pudo producir unos 3,15 megajulios de energía de fusión a partir de un total de 2,05 megajulios producidos por 192 haces de láser, con lo que, por primera vez en un experimento de fusión se consiguió una ganancia de energía en el blanco de aproximadamente 1,5. La energía necesaria para hacer funcionar los haces de láser fue de aproximadamente 300 megajulios.

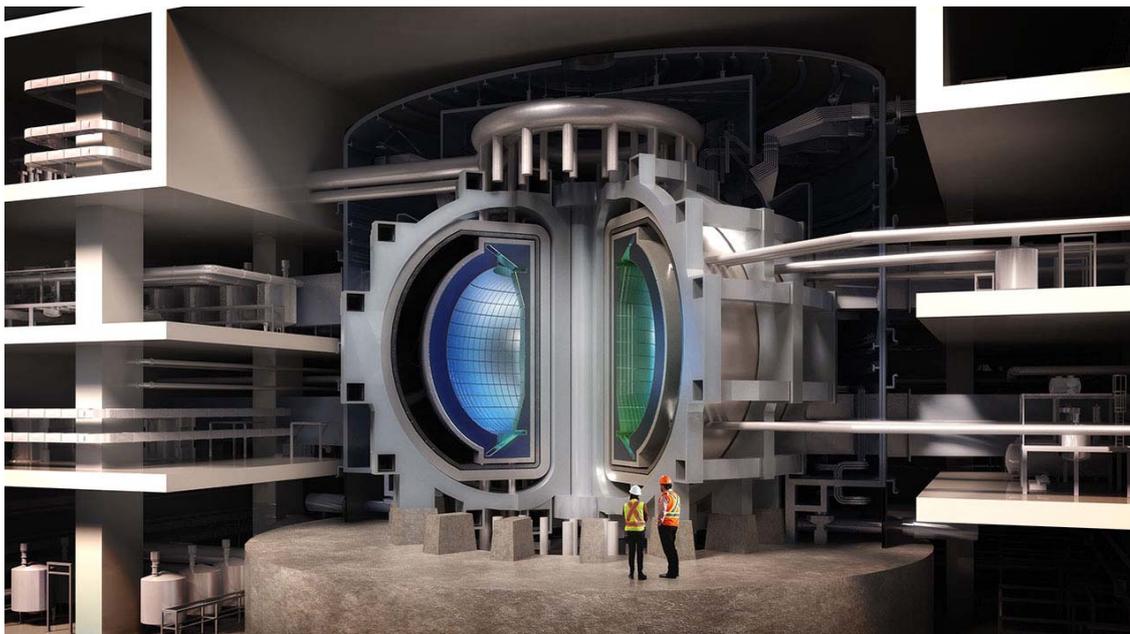
93. Gobiernos a nivel individual, empresas privadas y algunas empresas conjuntas público-privadas siguen desarrollando conceptos de central de demostración de la fusión (DEMO), cuya finalidad es demostrar la ganancia neta de energía eléctrica a partir de la fusión (figura D.3). Existen al menos 11 conceptos de DEMO en diversas etapas de desarrollo en la China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea y la Unión Europea, con fechas de conclusión entre 2025 y 2055. En Italia se siguió avanzando en la construcción de la instalación Divertor Tokamak Test (DTT), un tokamak superconductor dedicado al estudio de soluciones avanzadas de divisores para DEMO.



Fig. D.3. Hay más de 130 dispositivos de fusión experimentales, públicos y privados en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación, y varias organizaciones están estudiando diseños de centrales de demostración de la fusión. (Fuente: Sistema de Información de Dispositivos de Fusión del OIEA)

94. En octubre de 2022, el Gobierno del Reino Unido anunció la ubicación —el emplazamiento de una central eléctrica de carbón en West Burton, Nottinghamshire— de su programa tipo DEMO, el Tokamak Esférico para la Producción de Energía (STEP), que se prevé finalizar para 2040 y que tiene por finalidad demostrar la capacidad de generar electricidad neta a partir de la fusión y de producir tritio como combustible propio.

95. También en octubre de 2022, General Atomics, de los Estados Unidos de América, anunció planes para una planta piloto de fusión tipo tokamak compacta y avanzada en estado estable (figura D.4). El diseño tendrá un enfoque basado en sensores avanzados, algoritmos de control y computadoras de alto rendimiento para controlar el plasma, mantos de reproducción de carburo de silicio para producir el tritio y el calentamiento por microondas necesario para alimentar las reacciones de fusión.



*Fig. D.4. Representación del interior de la planta piloto de fusión de General Atomics
(fuente: General Atomics)*

96. El impresionante aumento de las inversiones del sector privado prosiguió en 2022. Las empresas de ese sector han declarado que han atraído en total alrededor de 5000 millones de dólares de los Estados Unidos y más de 3000 millones desde junio de 2021. En 2022 había 33 empresas del sector privado ubicadas en distintas partes del mundo, a saber, en Alemania, Australia, el Canadá, China, los Estados Unidos de América, Francia, Israel, Italia, el Japón y el Reino Unido (más del 70 % de ellas en los Estados Unidos de América).

Tendencias

97. En los Estados Unidos de América, en el marco de una cumbre de la Casa Blanca celebrada en marzo de 2022 que giró en torno a la elaboración de una visión audaz a diez años vista con respecto a la energía de fusión a escala comercial, se pusieron en marcha tres nuevas iniciativas, entre ellas una nueva iniciativa del Departamento de Energía (DOE) a nivel departamental sobre la fusión, con la incorporación a la Subsecretaría de Ciencia e Innovación del DOE de un nuevo coordinador jefe en materia de energía de fusión. Un aspecto recurrente de estas iniciativas fue el reconocimiento de que las alianzas público-privadas brindan la oportunidad de acelerar las actividades de investigación, desarrollo y demostración (ID&D) en el ámbito de la energía de fusión. A consecuencia de ello, en septiembre de 2022, a través de un anuncio de oportunidad de financiación, la Oficina de Ciencias del DOE invitó a la presentación de solicitudes para un nuevo programa de desarrollo de la fusión basado en hitos en asociación con el sector privado destinado a lograr diseñar una planta piloto de fusión.

98. La eficacia en la modelización de la dinámica del plasma basada en la inteligencia artificial y en el control de los experimentos de fusión en tiempo real ha registrado enormes mejoras que han acelerado la vía hacia la energía de fusión. Un ejemplo de ello es un estudio publicado en 2022 que mostró cómo sistemas de control basados en la inteligencia artificial eran capaces de crear y mantener una amplia gama de formas y configuraciones de plasma en el tokamak TCV de Suiza mediante la manipulación de 19 bobinas magnéticas en el interior del dispositivo (figura D.5). Como parte de un proyecto coordinado de investigación (PCI) iniciado recientemente por el Organismo, este y sus asociados han elaborado casos de uso y parámetros de referencia, y recopilado los datos conexos, para ensayar aplicaciones de inteligencia artificial en la ciencia de la fusión a escala internacional.

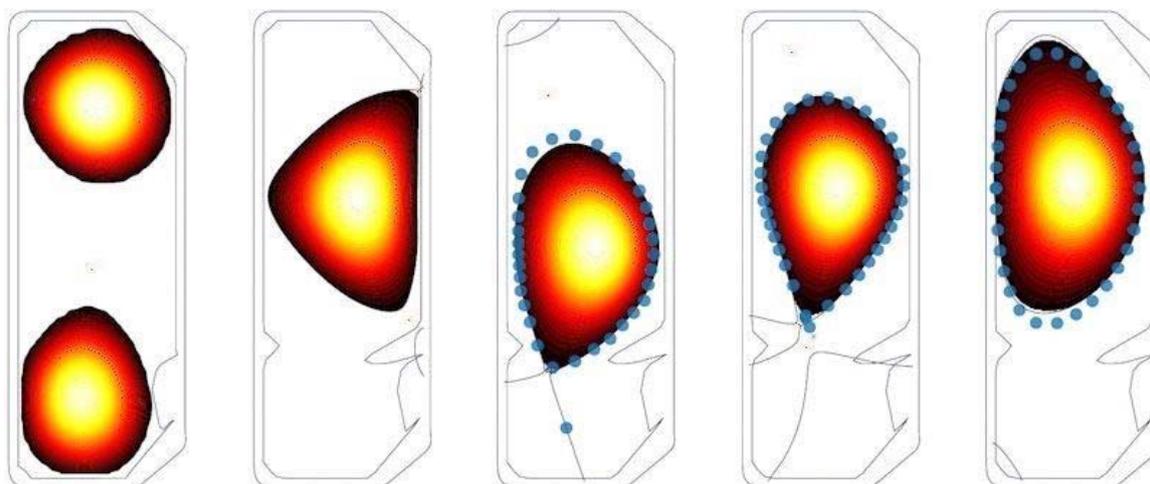


Fig. D.5. Gama de distintas formas y configuraciones de plasma generadas con el controlador del sistema basado en inteligencia artificial. De izquierda a derecha: gotitas, triangularidad negativa, forma tipo ITER, copo de nieve, plasma elongado. (Fuente: DeepMind y el Centro Suizo del Plasma de la Escuela Politécnica Federal de Lausana)

99. Además de la ciencia experimental, los Estados Miembros están acelerando el desarrollo de tecnología con su aparición en el sector privado, el posterior e importante aumento del capital invertido y los grandes avances recientes, así como con la marcha de los proyectos de fusión nacionales e internacionales a gran escala. En este contexto, varios Estados Miembros están estudiando opciones para establecer un marco nacional de seguridad adecuado para los sistemas de fusión. Las normas de seguridad del diseño y las orientaciones existentes relativas a las instalaciones nucleares, como las centrales nucleares o los aceleradores, no responden a las especificidades asociadas a las centrales de energía de fusión, ni contemplan los posibles peligros que de ellas se derivan.

100. Actualmente, alrededor de diez Estados Miembros tienen reguladas distintas instalaciones de fusión experimentales. En general, la explotación de esas instalaciones genera cantidades muy limitadas de material radiactivo en la demostración de la viabilidad de los conceptos propuestos. Los Estados Miembros están aplicando y, en su caso, adaptando los requisitos vigentes sobre la autorización y la supervisión de los marcos de protección radiológica o de las instalaciones nucleares para dar cabida a las primeras actividades de I+D relacionadas con futuras instalaciones de fusión a escala comercial. Este enfoque solo es factible a corto plazo y para el futuro se necesitan más avances en esta esfera.

101. Muchos países han reconocido que será necesario establecer marcos nacionales nuevos o actualizados para dar cabida a las complejidades adicionales de las instalaciones de fusión a escala comercial. Esas complejidades podrían comprender el uso o la generación de mayores inventarios de materiales radiactivos y de condiciones de funcionamiento extremas (p. ej., altas temperaturas, condiciones de vacío y tecnologías de refrigeración por metal líquido), con la necesidad de desarrollar nuevos materiales. Por otra parte, en comparación con los procesos de fisión, la fusión presenta niveles diferentes de riesgos potenciales y de riesgos asociados, por lo que podría requerir un marco regulador específico. Las expectativas con respecto al control del riesgo y el enfoque del regulador también podrían ser diferentes.

102. Los 70 años de experiencia con reactores de fisión nuclear podrían ayudar a desarrollar la tecnología de fusión necesaria para producir energía mediante la creación de sinergias entre la fisión y la fusión nuclear en el desarrollo de tecnología.

103. El desarrollo de un marco regulador, institucional y jurídico nacional adecuado para la fusión está intrínsecamente conectado con el desarrollo de este nuevo tipo de tecnología y su utilización comercial en el futuro. Está bien entendido que la armonización mundial en esta esfera respaldaría y aceleraría el crecimiento de una industria mundial de la fusión.

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

E.1. Reactores de investigación

Situación

104. Al final de 2022 había 233 reactores de investigación en funcionamiento, incluidos los que estaban en régimen de parada temporal, en 53 países. Estos



233 reactores de investigación en funcionamiento en
53 países al final de 2022

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. Las aplicaciones más frecuentes de los reactores de investigación se indican en el cuadro E-1 del anexo.

105. Se están construyendo 11 nuevos reactores de investigación, incluido un conjunto subcrítico y un sistema activado por acelerador, en 10 países: Arabia Saudita, Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Brasil, China, República de Corea, Federación de Rusia, Francia, República Checa y Ucrania. Hay 14 Estados Miembros que tienen planes oficiales de construir nuevos reactores de investigación: Bangladesh, Belarús, Bélgica, China, Estados Unidos de América, Filipinas, India, Nigeria, 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, India, Iraq, Kenya, Malasia, Mongolia, Myanmar, Níger, Rwanda, Senegal, Sudán, Túnez y República Unida de Tanzania.



11 nuevos reactores de investigación en construcción en
10 países



14 Estados Miembros tienen planes oficiales de construir nuevos reactores de investigación



16 países estudian la posibilidad de construir reactores de investigación

106. Prosiguieron los esfuerzos internacionales por reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME) en el sector civil. En 2022, el reactor IVG.1M de Kazajstán pasó a utilizar uranio poco enriquecido (UPE). Hasta la fecha, ascienden en total a 108 los reactores de investigación e importantes instalaciones de producción de isótopos de uso médico que han pasado de utilizar UME a utilizar UPE o que se ha confirmado que están en régimen de parada. En abril de 2023, todos los grandes productores mundiales de molibdeno 99, el radioisótopo médico más demandado, estarán utilizando métodos de producción sin UME. En total, se han repatriado a su país de origen o se han eliminado de otro modo 6885 kilogramos de UME de 48 países (y Taiwán (China)).

Tendencias

107. La proporción de reactores de investigación que llevan al menos 40 años en funcionamiento se está acercando al 70 %. Muchas entidades explotadoras han establecido, o están estableciendo, estrategias proactivas y programas sistemáticos de gestión del envejecimiento, reacondicionamiento y modernización para seguir manteniendo el funcionamiento seguro durante 60 años o más. Algunas entidades que explotan reactores de investigación con un alto grado de utilización están considerando la posibilidad de prolongar su vida útil hasta los 80 o incluso los 100 años (figura E.1). En este tipo de programas están empezando a aceptarse de forma generalizada elementos como el control de los efectos de las estructuras, sistemas y componentes en la seguridad y la fiabilidad del funcionamiento; la determinación y comprensión de los mecanismos de degradación; y la detección, monitorización y mitigación de los efectos del envejecimiento.

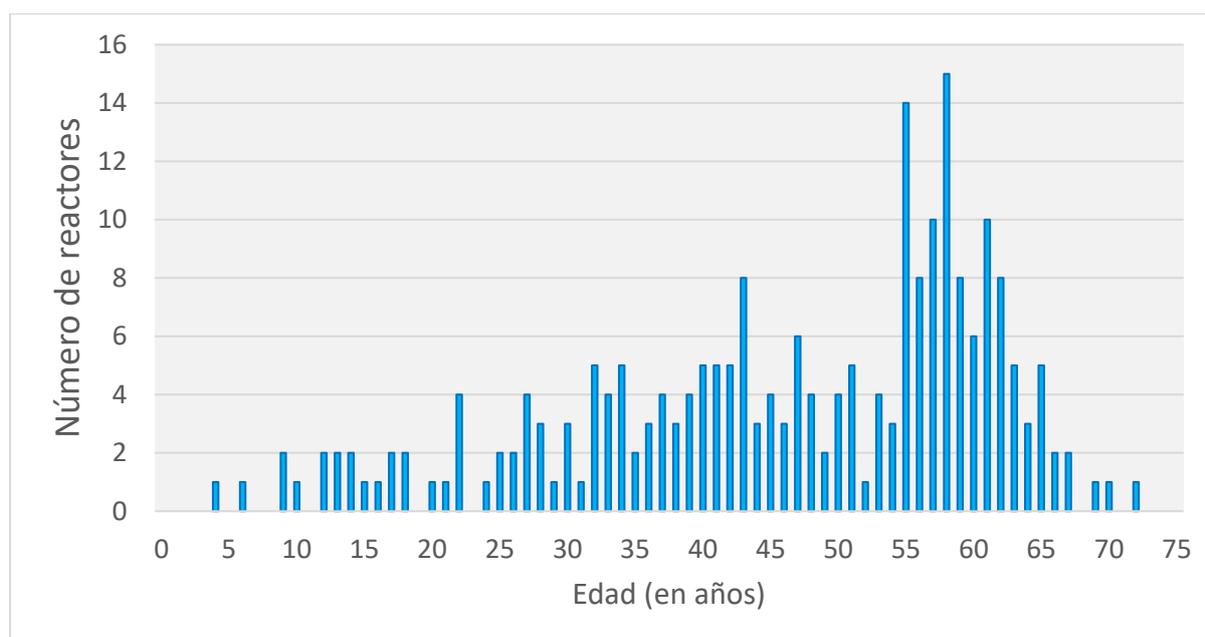


Fig. E.1. Distribución por edad de los reactores de investigación en explotación, noviembre de 2022 (fuente: Base de Datos de Reactores de Investigación del OIEA)

108. Muchos países aprovechan las oportunidades de acceso a reactores de investigación que ofrecen iniciativas de colaboración internacionales y regionales, como los Centros Internacionales basados en Reactores de Investigación y los Reactores-Laboratorios por Internet.

109. Tras una cierta disminución de la actividad debido a la pandemia de COVID-19, los Estados Miembros están intensificando sus esfuerzos por aumentar la utilización de sus reactores de investigación en funcionamiento. Mientras que la recuperación de los niveles de producción de radioisótopos anteriores a la pandemia ha supuesto la normalización de la demanda y el restablecimiento de las líneas

logísticas y de suministro críticas, la expansión de otras aplicaciones requiere un estudio minucioso del potencial de crecimiento y de las restricciones que pueden limitar dicho potencial. Por ejemplo, los actuales avances en la radiografía neutrónica en generadores de neutrones y reactores de investigación de potencia cero o de baja potencia ofrecen nuevas posibilidades de expansión para la aplicación de esta técnica, que se utiliza, entre otras cosas, para actividades de I+D, estudios del patrimonio cultural y aplicaciones industriales. Sistemas de bajo costo y alta calidad desarrollados inicialmente en la Fuente de Neutrones de Investigación Heinz Maier-Leibnitz de Alemania se han empezado a utilizar ya en otras instalaciones. Gracias al recién construido sistema de imagenología neutrónica del reactor VR-1 de la Universidad Técnica Checa de Praga se han podido obtener imágenes tomográficas tridimensionales (figura E.2). El reactor funciona a 500 vatios, una potencia inferior a la que anteriormente se consideraba posible para la tomografía neutrónica. En el reactor de investigación RECH-1 de Chile se ha instalado un sistema similar y otro se ensayó con éxito en la Instalación de Ciencia Neutrónica establecida recientemente en Seibersdorf, que se basa en generadores de neutrones compactos de deuterio-deuterio y de deuterio-tritio.

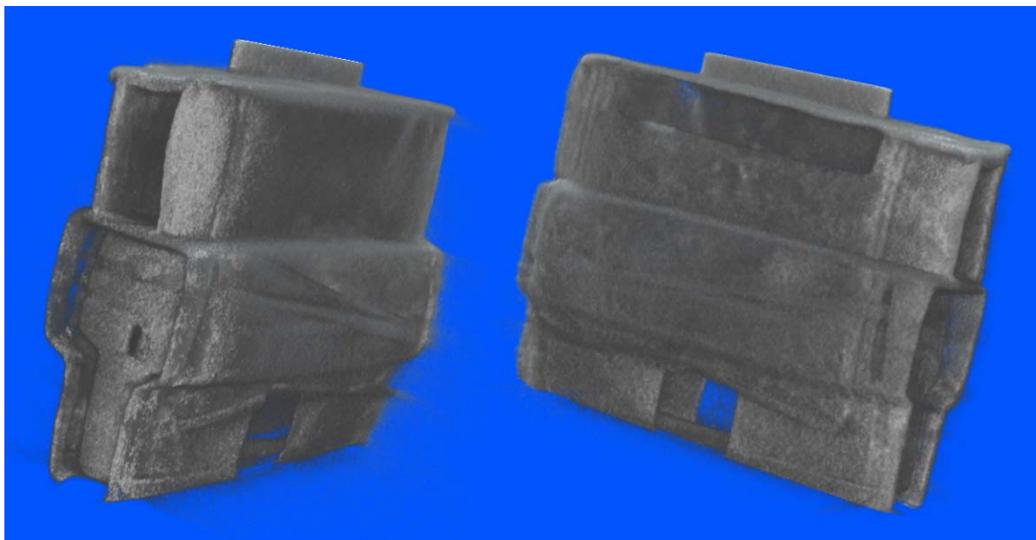


Fig. E.2. Dos secciones eficaces de una tomografía de una antigua cerradura tibetana tomada en el reactor VR-1 de 500 vatios de la Universidad Técnica Checa de Praga. (Imagen: Universidad Técnica Checa de Praga, República Checa; Centro Heinz Maier-Leibnitz, Universidad Técnica de Múnich, Alemania)

E.2. Aceleradores de partículas

Situación

110. La terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) es una terapia novedosa contra el cáncer en la que se utiliza de forma combinada un fármaco con boro que se dirige a los tumores y un haz de neutrones externo. El interés por la BNCT ha seguido aumentando en todo el mundo, en particular después de que el Japón aprobara la BNCT en instalaciones basadas en aceleradores como tratamiento clínico rutinario para el cáncer de cabeza y cuello recidivante irreseccable (figura E.3). Otros países tienen actualmente en una fase avanzada de desarrollo instalaciones para el tratamiento clínico rutinario, como las de Helsinki (Finlandia) y Xiamen (China), y en 2022 se anunciaron nuevos proyectos basados en aceleradores, incluida una segunda instalación en China, en la provincia de Hainan, y una instalación en Bruselas (Bélgica). En la actualidad hay más de 20 instalaciones de BNCT basadas en aceleradores en 11 Estados Miembros que se encuentran en distintas fases que van desde la planificación hasta el funcionamiento rutinario, y varias empresas están ofreciendo soluciones comerciales para el acelerador,

blancos de producción de neutrones y componentes de moderadores, sistemas de planificación del tratamiento y posicionamiento de los pacientes, y productos farmacéuticos. En el ámbito de la divulgación y la creación de capacidad, la Sociedad Internacional de Terapia por Captura Neutrónica es muy activa y publica comunicaciones periódicas, además de organizar una conferencia anual y eventos dedicados a la próxima generación de profesionales en el ámbito de la BNCT.



*Fig. E.3. Un estudiante que hace de paciente es posicionado para recibir BNCT en un curso de capacitación celebrado recientemente en el Centro Médico de BNCT de Kansai (Japón).
(Fotografía: Centro Médico de BNCT de Kansai)*

Tendencias

111. Uno de los principales usos industriales de los aceleradores de electrones de baja energía es la esterilización de productos médicos, incluidos los dispositivos médicos de un solo uso. Históricamente, la radioesterilización se ha realizado en la mayoría de los casos con fuentes gamma, como el cobalto 60. Sin embargo, debido a la limitada cadena de suministro y a los problemas de seguridad tecnológica y física asociados a la utilización y gestión del cobalto 60, muchos usuarios están buscando activamente alternativas basadas en aceleradores. Desde hace muchos años se emplea la esterilización directa con haces de electrones para tratar eficazmente productos de baja densidad. Además, al dotar a un acelerador de electrones con un convertidor de electrones en rayos X se genera un flujo de rayos X de intensidad suficiente para otros usos industriales. Aunque se trata de una solución con un consumo energético relativamente elevado, combina las ventajas de los aceleradores (alta tasa de dosis y, en consecuencia, alto rendimiento del producto) y de las fuentes gamma (alta penetración del producto).

112. El desarrollo de aceleradores de electrones más potentes y fiables sigue siendo el objetivo principal de la comunidad de usuarios y de varios proveedores de tecnología de todo el mundo, que trabajan activamente en este campo para conseguirlo. Los dispositivos existentes tienen una gran demanda y los fabricantes de aceleradores están esforzándose al máximo por satisfacer el creciente interés. Hoy en día, muchas empresas ofrecen una solución completa (acelerador de electrones, blanco de conversión de rayos X, estructuras de blindaje, transportador, sistemas de control de procesos, etc.) que a menudo puede adaptarse a las necesidades de los clientes, por ejemplo, para maximizar el rendimiento o procesar productos delicados, o para ofrecer una mayor versatilidad. Todas estas iniciativas en curso están cambiando gradualmente el panorama de las tecnologías de irradiación, con el consiguiente aumento de la cantidad de productos y servicios que ofrecen los aceleradores.

E.3. Instrumentación nuclear

Situación

113. La inteligencia artificial y sus derivados se siguen utilizando cada vez en más y más amplias aplicaciones de instrumentación nuclear. Recientemente se ha implantado en la detección de radiación en campos mixtos para la discriminación de pulsos producidos por partículas diferentes. Un ejemplo típico es la discriminación entre las señales de fotones y de neutrones en los centelladores plásticos. Una vez se han procesado los pulsos, se aplican algoritmos de clasificación para poder discriminarlos.

114. En un ámbito científico similar, las ciencias biológicas ya se benefician de las aplicaciones de la inteligencia artificial. Descifrar las estructuras de plegamiento de las proteínas con cristalografía de rayos X o de neutrones en 3D es un problema científico de larga data. Además de la instrumentación de detección avanzada que está empezando a estar disponible, la comunidad de la inteligencia artificial, incluidos proveedores privados, ha centrado sus esfuerzos en algoritmos de aprendizaje profundo que predicen con éxito las estructuras de las proteínas. Recientemente, los avances en el *software* de aprendizaje profundo en combinación con instrumentos que están a disposición del público nos han hecho replantearnos la forma en que entendemos el plegamiento del proteoma humano a distancias atómicas, y se prevé que estos avances permitan hacer descubrimientos revolucionarios en los próximos años.

Tendencias

115. Las aplicaciones de la inteligencia artificial a mayor escala han revolucionado el mundo de la física de alta energía. Conforme va aumentando la luminosidad de los aceleradores de hadrones, el número de partículas que se producen en cada colisión es cada vez mayor. En consecuencia, los detectores de seguimiento tienen que funcionar a tasas de recuento más elevadas, potencialmente con recuentos de fondo más altos, ya que el objetivo son los canales de descubrimiento de sondas poco frecuentes. Los respectivos algoritmos de reconstrucción tienen que hacer frente a una mayor carga útil de impactos del detector, clústeres y trayectorias. La comunidad de la física de partículas ha empezado a utilizar algoritmos de aprendizaje automático para optimizar y agilizar la reconstrucción de trayectorias y para reducir al mínimo las contribuciones de fondo de la identificación errónea de trayectorias. La comunidad también ha organizado concursos abiertos en los que se invita a los participantes a presentar sus algoritmos para estudiar el régimen de alta luminosidad del Gran Colisionador de Hadrones. En el contexto actual, en que los detectores están adentrándose en la era de la lectura sin disparador, una optimización en este sentido es aún más importante. Como en ocasiones anteriores, muchas de estas innovaciones en la física de partículas también tienen un gran potencial de aplicación en la instrumentación nuclear avanzada.

116. La tendencia a utilizar vehículos aéreos no tripulados para la detección y vigilancia de la radiación se ve influida actualmente por nuevos parámetros tendentes a una mayor carga útil, seguridad y durabilidad del vuelo, resistencia y precisión de la orientación. En la actualidad existen en el mercado nuevos vehículos aéreos no tripulados para la detección de radiaciones y la espectrometría gamma, que ofrecen una solución

completa para la cartografía radiológica. Se están desarrollando contenedores robóticos para el funcionamiento autónomo de los vehículos aéreos no tripulados y, en las misiones a distancia, el despegue y aterrizaje, la carga o sustitución de baterías, la protección frente a las condiciones meteorológicas, etcétera, pueden realizarse de forma automática. Gracias a que la exactitud de los sistemas mundiales de navegación por satélite es cada vez mayor, los estudios han empezado a centrarse más en la precisión del escaneo de objetos más pequeños, como muelles de carga portuarios, contenedores o edificios.

117. El uso de detectores de radiación basados en fotomultiplicadores de silicio ha mejorado el rendimiento y ha dado lugar a sistemas más compactos. La electrónica integrada para la compensación de la temperatura y la electrónica de lectura desempeñan un papel importante para su aplicación en la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados. En los sistemas basados en vehículos aéreos no tripulados están apareciendo detectores como centelladores plásticos, detectores GAGG y detectores que permiten la detección gamma y neutrónica basados en $ZnS(Ag)/^6LiF$ o CLYC y CLLB.

118. La aplicación de detectores de centelleo plásticos parece ser una nueva tendencia. El plástico es prometedor por su bajo peso específico (densidad en torno a 1 g/cm^3), sus diversas formas y su alta sensibilidad de detección. Los algoritmos existentes de procesamiento de espectros permiten a los detectores plásticos distinguir entre isótopos artificiales y NORM, o identificar radionucleidos básicos, especialmente industriales.

119. También han empezado a utilizarse nuevos enfoques para el procesamiento de datos en tiempo real y para el procesamiento posterior a fin de optimizar el tiempo que toma a los vehículos aéreos no tripulados llevar a cabo misiones de detección de la radiación. Por ejemplo, existen distintas combinaciones de un sensor de radiación con un sistema de detección y localización por ondas luminosas (LIDAR) que permiten obtener imágenes gamma 3D de alta resolución en tiempo real o una cartografía dual de rayos gamma y neutrones con discriminación de neutrones y rayos gamma. El uso de una cámara de alta resolución para la fotogrametría en 3D o LIDAR permite aplicar técnicas de reconstrucción algebraica para corregir las distancias de todas las superficies implicadas y para la respuesta del detector en 3D, como se ilustra en la figura E.4.

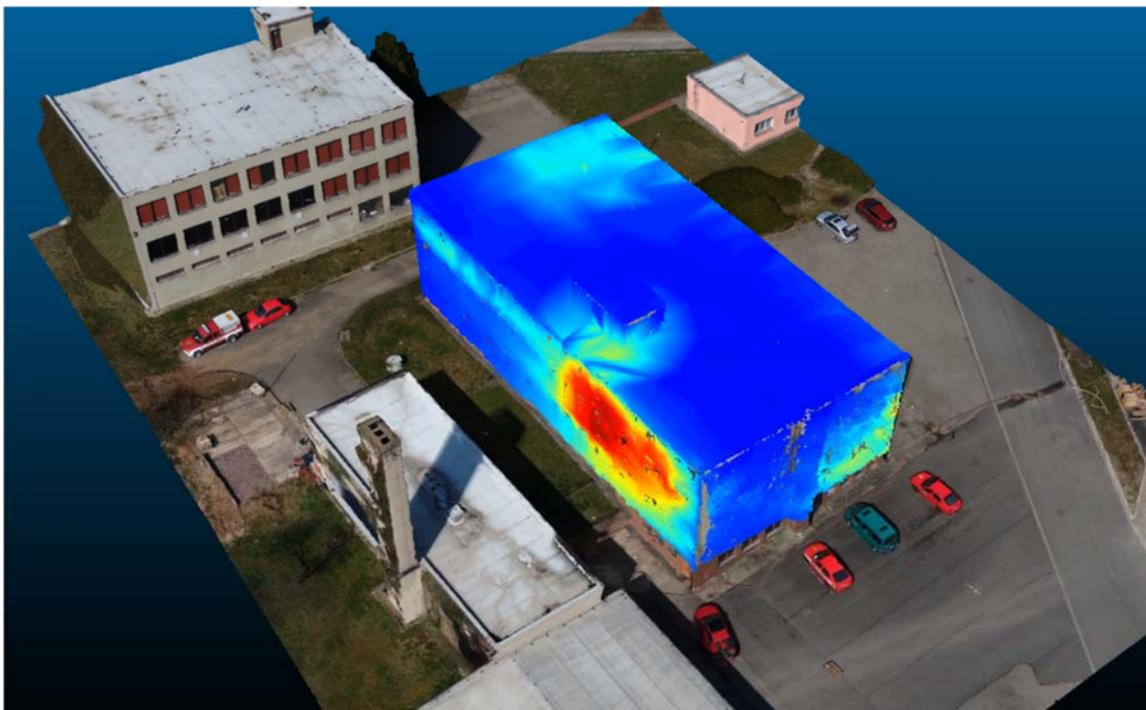


Fig. E.4. Ejemplo de cartografía radiológica en 3D basada en vehículos aéreos no tripulados de un edificio que contiene fuentes/materiales radiactivos. (Gráfico: OIEA)

F. Alimentación y agricultura

F.1. Respuesta rápida a las crisis de inocuidad de los alimentos

Situación

120. Sucesos recientes, como la pandemia de COVID-19, conflictos y desastres naturales relacionados con el clima, han puesto de manifiesto la vulnerabilidad del suministro mundial de alimentos en situaciones de tensión, así como la necesidad de incrementar la resiliencia mediante la reforma de los sistemas de control de los alimentos y la mejora del apoyo técnico. Las crisis y emergencias, como los fenómenos climáticos extremos, las catástrofes naturales, las epidemias y las pandemias, perturban los sistemas de control de la inocuidad de los alimentos, comprometen la inocuidad de los alimentos y la seguridad alimentaria, y presentan oportunidades para la adulteración de alimentos y los delitos alimentarios. Reforzar la preparación y la capacidad de respuesta rápida de los Estados Miembros es fundamental para hacer frente a estos desafíos.

121. Los sistemas de control de los alimentos suelen emplear programas de pruebas de laboratorio de dos niveles. Se utilizan métodos de prueba eficaces en relación con los costos y de alto rendimiento para analizar productos muestreados conforme a los planes nacionales de vigilancia reglamentaria de la inocuidad de los alimentos. Cualquier resultado que indique una posibilidad de contaminación por encima de los niveles de tolerancia reglamentarios se verifica posteriormente mediante técnicas más sofisticadas que requieren más tiempo. Las técnicas nucleares, como la espectrometría de masas por dilución isotópica y las mediciones de la relación isotópica de isótopos estables, desempeñan un papel importante en estas pruebas. Para garantizar que en la oferta de alimentos no haya alimentos contaminados, las pruebas de cribado están orientadas a obtener el mínimo número posible de resultados negativos falsos (cuando los alimentos contaminados no son detectados). Sin embargo, debido al desempeño del método analítico y a la incertidumbre de la medida, puede haber resultados positivos falsos (cuando los alimentos no contaminados son clasificados erróneamente como contaminados), lo que afecta a los productores y a la industria alimentaria. En el segundo nivel —las pruebas de confirmación— se detecta con certeza la contaminación con muy pocos resultados positivos falsos. Este tipo de sistema de control de los alimentos protege tanto a los consumidores como a los productores y posibilita el comercio.

122. Los cambios en las condiciones ambientales están alterando los patrones de toxinas naturales en la producción agrícola, ganadera y pesquera. Por ejemplo, los cambios en las condiciones climáticas favorecen el crecimiento de hongos productores de micotoxinas en regiones donde antes no estaban presentes y en las que los productores no tenían que preocuparse por este tipo de amenazas. Es probable que el aumento de las temperaturas, junto con la eutrofización, incremente la frecuencia y la duración de las floraciones de cianobacterias en muchos ecosistemas acuáticos, así como la bioacumulación de metilmercurio en especies de peces comerciales, lo que plantearía riesgos adicionales para la inocuidad de los alimentos (figura F.1).

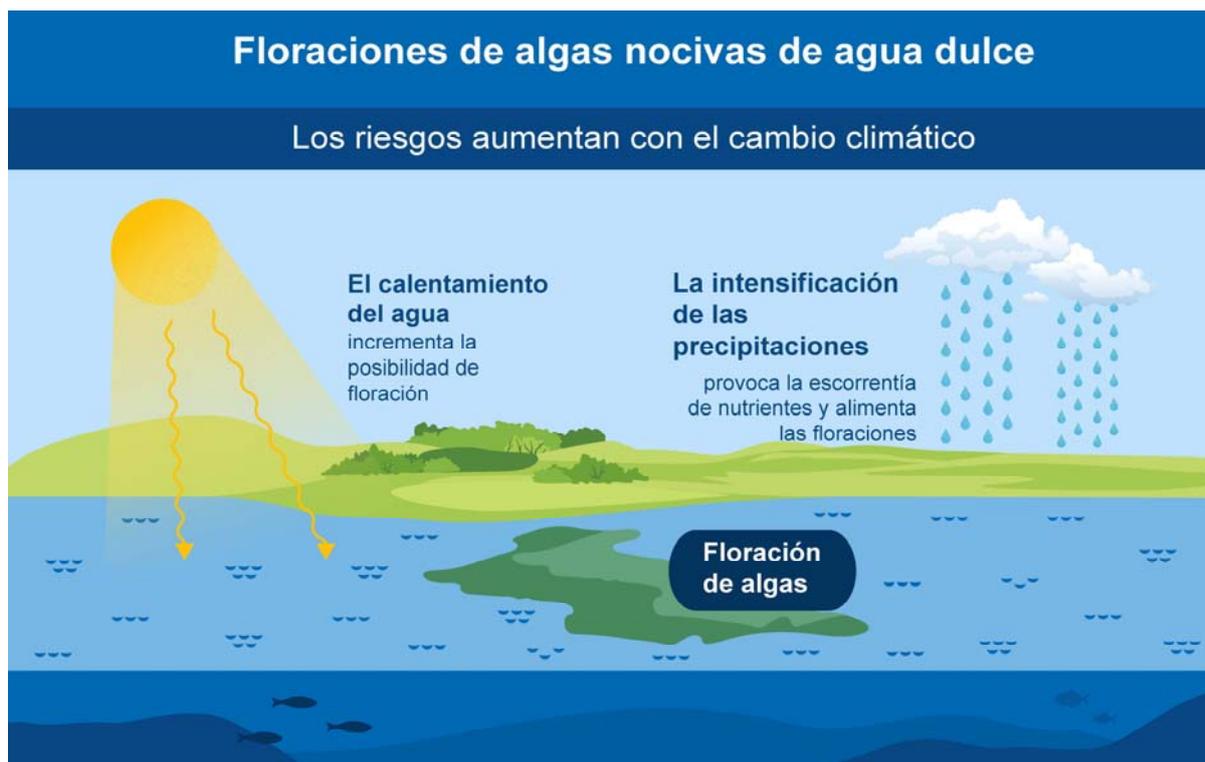


Fig. F.1. El riesgo de la presencia de toxinas en los alimentos de origen marino debido a la contaminación procedente de floraciones de cianobacterias (floraciones de algas nocivas) aumenta a consecuencia del cambio climático.

(Gráfico: OIEA, basado en www.climatecentral.org/climate-matters/harmful-algal-blooms)

123. El cambio climático también afecta la prevalencia y la distribución de plagas y vectores de enfermedades, lo que exige una modificación del uso de pesticidas y medicamentos veterinarios. Esto puede plantear un riesgo adicional en el caso de que queden residuos en los alimentos. El uso de sustancias antimicrobianas en animales de granja también ha sido asociado a la resistencia a los antimicrobianos, lo que puede dar lugar al desarrollo de bacterias resistentes y a su posible transferencia a través de alimentos contaminados.

124. Cada uno de estos factores, por separado o en conjunto, puede tener efectos drásticos en los diversos componentes del enfoque “Una Salud”, especialmente en lo que respecta a la inocuidad y la integridad de la oferta de alimentos y piensos. Estos efectos se ven agravados cuando los sistemas de control habituales sufren perturbaciones, como han demostrado las repercusiones de la pandemia de COVID-19, a pesar de que la enfermedad no se transmite por los alimentos.

Tendencias

125. En situaciones de emergencia, cuando las cadenas de suministro se perturban y los laboratorios y sistemas de control de los alimentos se ven comprometidos o no están disponibles, la prioridad absoluta es garantizar que la oferta de alimentos siga siendo segura. Proteger la salud de los consumidores y evitar que los servicios de salud se enfrenten a problemas adicionales relacionados con la inocuidad de los alimentos ayuda a evitar que se agudicen las crisis. Por lo tanto, en situaciones de crisis, el énfasis debe desplazarse a métodos de cribado rápidos y fáciles de aplicar, con el objetivo de mantener los estándares de inocuidad de los alimentos y determinar o confirmar el origen de los alimentos contaminados. Los recursos disponibles pueden así destinarse a técnicas de alta calidad que proporcionen información esencial para controlar y gestionar las crisis.

126. El análisis rápido de los alimentos se sustenta en diversas técnicas nucleares e isotópicas, así como en mediciones de la composición isotópica, utilizadas por separado o junto con técnicas complementarias. Las técnicas analíticas nucleares se sirven de parámetros sólidos, como la masa, el espín, el momento magnético, los niveles de energía del núcleo y los electrones de la capa interna del átomo, y las mediciones isotópicas de la composición elemental.

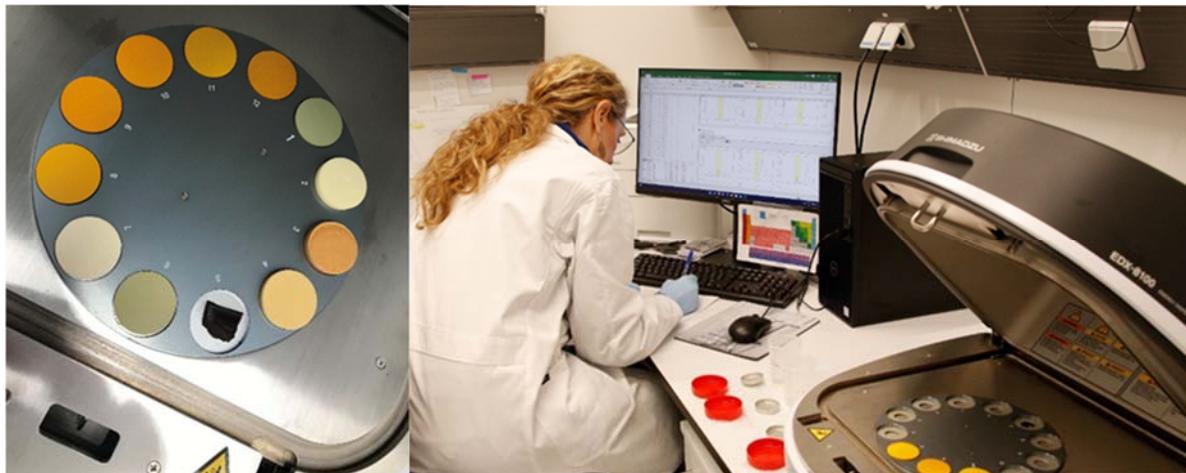


Fig. F.2. Análisis de muestras de cúrcuma mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva en formato de sobremesa para detectar elementos tóxicos en el Laboratorio de Inocuidad y Control de los Alimentos del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura en Seibersdorf (Austria). (Fotografía: OIEA)

127. Recientes avances en las tecnologías fotónicas y de semiconductores, entre otras, han posibilitado la miniaturización de los instrumentos analíticos, lo que ha dado lugar a una variedad de dispositivos portátiles, de sobremesa y de mano que pueden utilizarse no solo en el laboratorio, sino en diversos puntos de las cadenas de producción y suministro de alimentos. Estos dispositivos ayudan a intervenir rápidamente en situaciones de crisis al proporcionar información para la toma de decisiones.

128. Un ejemplo es el desarrollo de aplicaciones de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) para el cribado rápido de alimentos con el fin de detectar la presencia de nutrientes elementales y metales tóxicos, como el plomo, el cadmio y el arsénico, a los niveles reglamentarios establecidos por la Organización Mundial de la Salud.² La técnica está disponible en formatos de mano y de sobremesa (figura F.2) y puede ser utilizada sobre el terreno o *in situ* por operadores no especializados. Requiere una preparación mínima de la muestra y no utiliza reactivos perjudiciales para el medio ambiente. En combinación con herramientas quimiométricas, el desempeño predictivo de la EDXRF también puede ampliarse a cuestiones de fraude alimentario.

129. Otro ejemplo es la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica (GC-IMS), una técnica que emplea una fuente de radiación de hidruro de tritio de baja energía. La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica (GC-IMS) (figura F.3) puede utilizarse para detectar huellas de compuestos orgánicos volátiles microbianos, que indican la presencia de un hongo, lo que avisa anticipadamente de la posible producción de micotoxinas en los alimentos y permite adoptar medidas de control.³ Mediante la GC-IMS se pueden detectar muchos otros contaminantes y huellas peligrosas en los alimentos, como la presencia de metanol, una sustancia química que se puede encontrar en bebidas

² Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, *Food Chemistry: X 1*, Vol. 1 (2019).

³ Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS-GC-IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut, *Food Science & Nutrition*, Vol. 9, Issue 5 (2021).

alcohólicas adulteradas y que tiene metabolitos tóxicos cuando se ingiere, y de óxido de etileno, un pesticida tóxico que desde 2020 ha sido la causa de que en múltiples ocasiones en Europa se retiraran del mercado productos alimentarios contaminados.



Fig. F.3. Análisis de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica para detectar las huellas características de contaminantes de los alimentos llevado a cabo en el Laboratorio de Inocuidad y Control de los Alimentos del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura en Seibersdorf (Austria). (Fotografía: OIEA)

130. Estas y otras técnicas analíticas nucleares rápidas, como la espectroscopia por resonancia magnética nuclear en formato de sobremesa y el análisis de isótopos estables mediante espectroscopia por exploración anular total de la cavidad, en combinación con métodos espectroscópicos en formato portátil, como la espectroscopia Raman de superficie mejorada y la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, proporcionan un conjunto de potentes instrumentos analíticos. Las aplicaciones de estos instrumentos para el análisis de alimentos sobre el terreno, que posibilitarán una respuesta aún más eficaz a las emergencias o crisis que afecten la oferta de alimentos, están evolucionando rápidamente.

F.2. Avances en la irradiación de alimentos: mayor uso de fuentes mecánicas y nueva tecnología de haces blandos

Situación

131. La irradiación de alimentos es una forma de mejorar la inocuidad de los alimentos, mantener su calidad y prolongar su tiempo de conservación sin utilizar productos químicos. Ya sea a través de fotones gamma, haces de electrones o rayos X, la radiación ionizante no afecta a los alimentos, pero sí a los microbios y las plagas. Dado que la irradiación no provoca un aumento notable de la temperatura de los alimentos,

su aplicación de manera controlada no afecta la calidad nutricional ni repercute significativamente en el sabor, la textura o el aspecto de los alimentos. En la irradiación convencional de alimentos, los haces tienen energía y son penetrantes, lo que permite irradiar incluso alimentos preenvasados. La envoltura también protege a los alimentos del riesgo de contaminación externa después del tratamiento.

132. La irradiación de al menos un tipo de producto alimenticio está permitida en unos 70 países, y en más de 160 instalaciones de irradiación de alrededor de 50 países se tratan alimentos habitualmente (figura F.4). En el modelo de negocio predominante, los centros de irradiación comerciales funcionan como proveedores de servicios polivalentes: administran sistemáticamente la dosis certificada de radiación ionizante, en un rango de dosis predefinido, a diversos productos a fin de atender las necesidades de clientes de sectores como los de la medicina, los medicamentos y los alimentos.

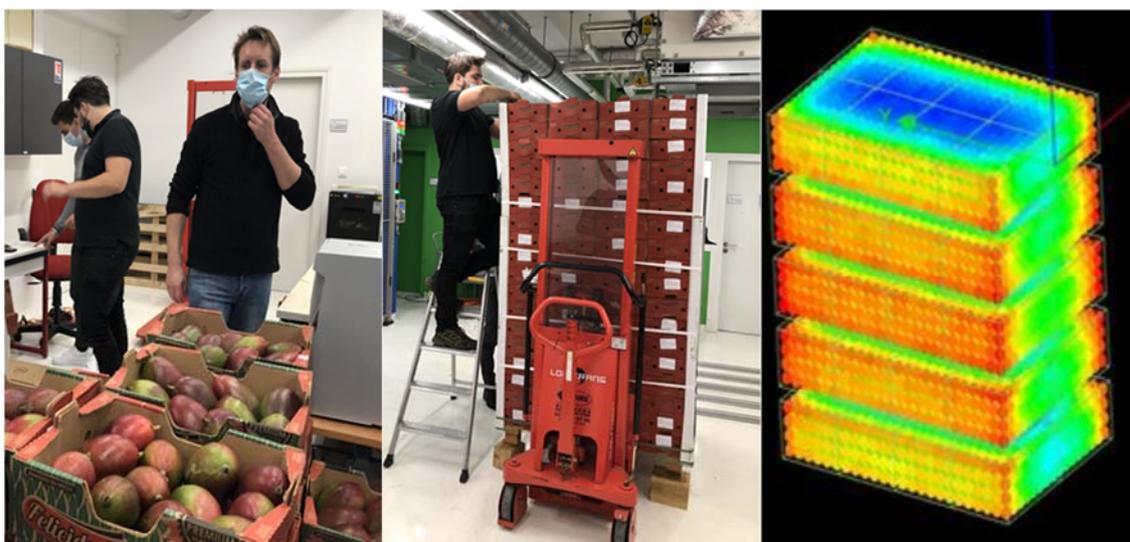


Fig. F.4. Expertos de una instalación de irradiación de alimentos en Francia realizan pruebas para verificar que la irradiación con rayos X de mangos en palés pueda alcanzar la dosis mínima necesaria para un correcto tratamiento fitosanitario (izquierda y centro). El mapa de dosis ilustra la variación de la dosis absorbida (derecha). (Fotografías: Aerial, Francia)

133. En la actualidad, casi todos los productos alimentarios irradiados se procesan en instalaciones especializadas que utilizan rayos gamma de cobalto 60, un radioisótopo que emite fotones de alta energía de 1,17 y 1,33 megaelectronvoltios (MeV). Alrededor del 90 % de las instalaciones comerciales de irradiación de alimentos utilizan rayos gamma, mientras que otras utilizan la irradiación por fuente mecánica, que produce haces de electrones de alta energía generados eléctricamente (hasta 10 MeV) y/o rayos X (habitualmente hasta 5 MeV, aunque algunos países permiten hasta 7,5 MeV). Alrededor del 5 % de los proveedores de servicios de irradiación de alimentos han invertido en la adquisición de capacidad en materia de fuentes mecánicas de haz de electrones y rayos X, además de sus unidades de irradiación de cobalto 60. La diversidad tecnológica es cada vez más importante, ya que la demanda de fuentes de cobalto sigue aumentando y la producción de cobalto 60 tiene un plazo de ejecución de varios años. Dado que el radionucleido cobalto 60 es cada vez más costoso, la irradiación con haces de electrones, e incluso con rayos X, se han vuelto alternativas atractivas, y el interés en la tecnología de haces blandos que utiliza fuentes mecánicas va en aumento (figura F.5).

134. Un buen ejemplo de la utilidad de la irradiación de alimentos es el caso de los alimentos deshidratados, como las especias, en los que muchos microbios, incluidos microorganismos patógenos transmitidos por los alimentos como la salmonela, *Bacillus cereus* y *Clostridium perfringens*,

pueden sobrevivir en estado de deshidratación.⁴ Aunque los niveles de contaminación pueden ser bajos, la adición de especias deshidratadas a los alimentos proporciona a esos microorganismos tanto agua como un entorno rico en el que pueden multiplicarse rápidamente y prosperar. Por lo tanto, los tratamientos de reducción microbiana son necesarios para reducir al mínimo los riesgos de enfermedad entre los consumidores y las pérdidas comerciales derivadas del deterioro de los alimentos. Los tratamientos térmicos, aunque eficaces, también eliminan los componentes volátiles que confieren a las especias sus sabores únicos, colores vibrantes y aromas, así como sus atributos beneficiosos para la salud. En cambio, la radiación ionizante destruye los microbios mencionados, pero tiene un efecto mínimo en los componentes de las especias responsables de sus atributos sensoriales, de calidad y de bienestar. La radiación ionizante también puede ralentizar la maduración y así evitar la germinación de alimentos como el ajo, el jengibre, la cebolla y la papa.



Fig. F.5. Equipo de procesamiento de alimentos mediante electrones blandos. La máquina Laatu utiliza dos lámparas de electrones de baja energía (las asas rojas en el centro de la foto) para procesar los ingredientes deshidratados a medida que caen a través de un flujo de electrones. Con un consumo energético reducido de hasta un 80 % menos que los métodos que utilizan vapor, ofrece una solución económica para la reducción microbiana. (Fotografía: Bühler)

⁴ *Microbiological hazards in spices and dried aromatic herbs: Meeting report* (Microbiological Risk Assessment Series No. 27, FAO/WHO, Rome, 2022).

135. Dado que impide que las plagas se desarrollen y reproduzcan, la radiación ionizante también se utiliza como tratamiento fitosanitario para posibilitar el comercio a través de las fronteras de cuarentena. Por ejemplo, puede garantizar que las plagas de importancia económica, como las moscas de la fruta y los gorgojos, no puedan propagarse y establecerse en nuevos territorios a través del comercio de frutas y hortalizas frescas.

136. El Organismo y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) han estado ayudando a los Estados Miembros (figura F.6.) a establecer y ampliar los servicios de irradiación de alimentos, reduciendo así la pérdida y el desperdicio de alimentos y facilitando el comercio de especias deshidratadas y mariscos y frutas frescos y congelados. Un ejemplo reciente es el caso de Viet Nam, que se ha procurado exportaciones de mango, pitahaya y lichi frescos a los Estados Unidos de América por un valor de 20 millones de dólares anuales y ha ampliado el comercio con Australia.



Fig. F.6. El 31 de octubre de 2022, el Director General, Rafael Mariano Grossi, y el Director General de la FAO, Qu Dongyu, firmaron un memorando de entendimiento entre ambas organizaciones sobre el fortalecimiento de la cooperación FAO/OIEA en la esfera de la aplicación pacífica de la tecnología nuclear en la alimentación y la agricultura, en la Sede del Organismo en Viena (Austria). (Fotografía: OIEA)

Tendencias

137. Una tendencia destacable es la expansión de la irradiación con fuentes mecánicas. El auge de las fuentes mecánicas se debe a sus ventajas tanto económicas como prácticas. A diferencia de la irradiación gamma, las fuentes mecánicas de radiación ionizante pueden encenderse y apagarse, con lo que los haces de radiación se emiten según se desee. De esta manera, evitan los problemas relacionados con la adquisición y la seguridad tecnológica y física (transporte, almacenamiento y disposición final) asociados a los radioisótopos. Aunque la irradiación gamma es una tecnología sencilla, fiable y consolidada que seguirá estando disponible durante muchos años, las tecnologías alternativas ayudan a complementar la capacidad disponible y permiten ampliar el uso de la irradiación de alimentos.

138. El Organismo ha prestado apoyo a los Estados Miembros en su labor dirigida a desarrollar aplicaciones novedosas y prácticas de la irradiación de alimentos mediante fuentes mecánicas a través de actividades coordinadas de investigación.⁵ Los nuevos avances en esta esfera incluyen el desarrollo de instrumentos que pueden simular el proceso de irradiación de alimentos y determinar rápidamente los parámetros óptimos de tratamiento. Instituciones de China y Viet Nam han diseñado, construido, probado e instalado nuevos dispositivos que ayudan a los centros comerciales de irradiación con haces de electrones de alta energía a modelizar y calcular las distribuciones de dosis para distintas configuraciones de carga. Estos dispositivos permiten determinar de antemano los valores óptimos, lo que permite la realización de ensayos rápidos en las instalaciones y, en última instancia, reduce el tiempo muerto de haz y aumenta la productividad. Los expertos de la Universidad de Tsinghua (China) han llevado el concepto más lejos colaborando con la empresa de tecnología NUCTECH para desarrollar un producto comercial.⁶ Estos instrumentos, así como otros similares que se están desarrollando en otros lugares, tienen por objeto facilitar las buenas prácticas y mejorar la productividad en las instalaciones de irradiación gamma y con rayos X, así como en las instalaciones de haz de electrones.

139. Una investigación que está llevando a cabo la Universidad de Texas A&M (Estados Unidos de América), que es un centro colaborador del Organismo, se centra en métodos eficaces y rápidos para calcular la dosis de reducción decimal (D10) de microorganismos patógenos en un conjunto de entornos diferentes. La D10 es la dosis de radiación necesaria para inactivar el 90 % de la población microbiana viable inicial. La dosis eficaz de irradiación esterilizante puede calcularse como múltiplo de D10. La investigación de la Universidad de Texas A&M financiada por el Organismo es un ejemplo de cómo la investigación aplicada puede tomar nuevos rumbos en respuesta a los cambios en las necesidades, en este caso, la necesidad de mejorar las técnicas que ayudan a evitar la transferencia de patógenos a través de los alimentos y, con ello, prevenir la propagación de pandemias a través de los alimentos.

140. Una tendencia interesante en el desarrollo de las tecnologías de irradiación tiene que ver con la capacidad de modificar y ajustar la energía de haz que ofrecen los dispositivos de fuente mecánica. Por ejemplo, los haces de baja energía (electrones blandos o rayos X blandos), cuya energía se mide en kiloelectronvoltios (keV), pueden utilizarse en lámparas de irradiación relativamente compactas que pueden alojarse de forma segura en armarios u otros dispositivos. Ello permite llevar la irradiación de alimentos a la fábrica, ya que estos dispositivos de haces blandos pueden integrarse en las líneas de producción de alimentos. Dado que los electrones blandos no pueden atravesar por completo los alimentos, sirven para tratar de forma eficaz aquellos en los que los microorganismos se encuentran principalmente en la superficie o cerca de esta, como los huevos enteros con cáscara (figuras F.7 y F.8), los cortes enteros crudos de carne y aves de corral y las semillas deshidratadas enteras (hierbas y especias). Los rayos X blandos también pueden utilizarse cuando se necesita que el haz atraviese lotes pequeños de un alimento.

⁵ *Development of Electron Beam and X Ray Applications for Food Irradiation: Final Report of a Coordinated Research Project* (IAEA-TECDOC-2008, Vienna, 2022).

⁶ Qin H., Yang, G., Kuang, S., Wang, Q., Liu, J., Zhang, X., Li C., Han, Z., Li, Y., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 143 (2018) 8–13.



Fig. F.7. Concepto que muestra el uso de electrones blandos (e^-) con diferentes energías para penetrar una cáscara de huevo a diferentes profundidades. El objetivo es asegurar que los electrones puedan destruir la salmonela que se encuentra principalmente en o cerca de la superficie de la cáscara de los huevos enteros frescos. (Gráfico: OIEA, basado en el trabajo de N. Takaoka, Instituto Metropolitano de Investigación en Tecnología Industrial de Tokio, Japón)



Fig. F.8. Modelo de simulación para calcular el alcance de electrones blandos de 200 keV en cáscaras de huevo y determinar la viabilidad de alcanzar la salmonela a una profundidad de menos de 0,2 mm. (Gráfico: OIEA, basado en el trabajo de Y. Liu, H. Qin, H. Shi de Nuctech Ltd. y H. Zhang de la Universidad de Tsinghua, China)

141. Las investigaciones indican que los electrones blandos pueden mejorar la calidad de algunos alimentos, además de ser un método prometedor de descontaminación microbiológica superficial y cerca de la superficie. Por ejemplo, la empresa de ingeniería de los alimentos Bühler ha desarrollado un sistema de caída libre para hacer pasar ingredientes deshidratados a través de un haz de electrones blandos (<300 keV), un método que garantiza el control de la contaminación microbiológica y su mantenimiento en niveles aceptables.^{7,8} Un ejemplo del desarrollo de la irradiación con rayos X blandos para lotes pequeños es el caso del irradiador de armario, como los utilizados generalmente para esterilizar instrumental médico, que investigadores del Instituto de Tecnología Avanzada de la Radiación del Instituto de Investigaciones sobre Energía Atómica de Corea estudiaron como medio de procesamiento de alimentos. El objetivo perseguido por los investigadores era utilizar una tecnología de haces blandos fácilmente accesible en los hospitales para proporcionar a los pacientes inmunocomprometidos alimentos de muy alta calidad higiénica, y se ha demostrado que esta tecnología de rayos X de baja energía (160 keV) puede garantizar que las verduras frescas cortadas tengan esa calidad.

142. En la actualidad se está llevando a cabo un proyecto coordinado de investigación del Organismo sobre la innovación en la irradiación de alimentos por fuentes mecánicas de haces de baja energía, que se centra en abordar los desafíos técnicos y aumentar el potencial de las nuevas tecnologías de haces blandos. Países que participan en proyectos de cooperación técnica en las regiones de África y Asia y el Pacífico ya han expresado su interés y deseo de que la irradiación con haces blandos sea comercialmente viable en todo el mundo.

G. Radioisótopos y tecnología de la radiación

G.1. Novedades en el ámbito de los radiofármacos teranósticos

Situación

143. Los agentes teranósticos combinan un radionucleido para el diagnóstico del cáncer con otro radionucleido para el tratamiento. Aunque algunos radioisótopos individuales decaen con emisiones adecuadas para la teranóstica, por lo general se utilizan pares de radioisótopos (figura G.1).

144. Un ejemplo clásico de agente teranóstico en medicina nuclear combina la emisión gamma del yodo 123 y la emisión beta del yodo 131 para el diagnóstico y el tratamiento de trastornos tiroideos. Gracias a la disponibilidad de pares complementarios de radioisótopos propicios para el diagnóstico y el tratamiento (por ejemplo, el radioisótopo de diagnóstico galio 68 y el radioisótopo terapéutico lutecio 177), los enfoques teranósticos se han vuelto más comunes en el último decenio. Dado que presentan propiedades químicas similares, los radiofármacos de lutecio y galio pueden tener un diseño farmacéutico igual o semejante (un quelato más un conector ligado a diferentes vectores dirigidos, como diversos péptidos, anticuerpos o pequeñas moléculas orgánicas). Un radiofármaco con un vector específico para tumores radiomarcado con galio 68 de diagnóstico por tomografía por emisión de positrones (PET) permite el diagnóstico y la caracterización *in vivo* de tumores, lo que hace posible la detección mediante PET, la prueba preterapéutica de la expresión de la diana, la estadificación y la selección de los pacientes para radioterapia sistémica. El tratamiento de los pacientes con

⁷ Laatu: *Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods* (Bühler, 2019).

⁸ Schottroff, F., Lasarus, T., Stupak, M., Hajslova, J., Fauster, T., Jäger, H., Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Vol. 14 1 (2021) 380–395.

un radiofármaco terapéutico de lutecio 177 marcado con el mismo vector permite el manejo selectivo personalizado del cáncer de cada paciente mediante terapia dirigida con radionucleidos a nivel molecular.

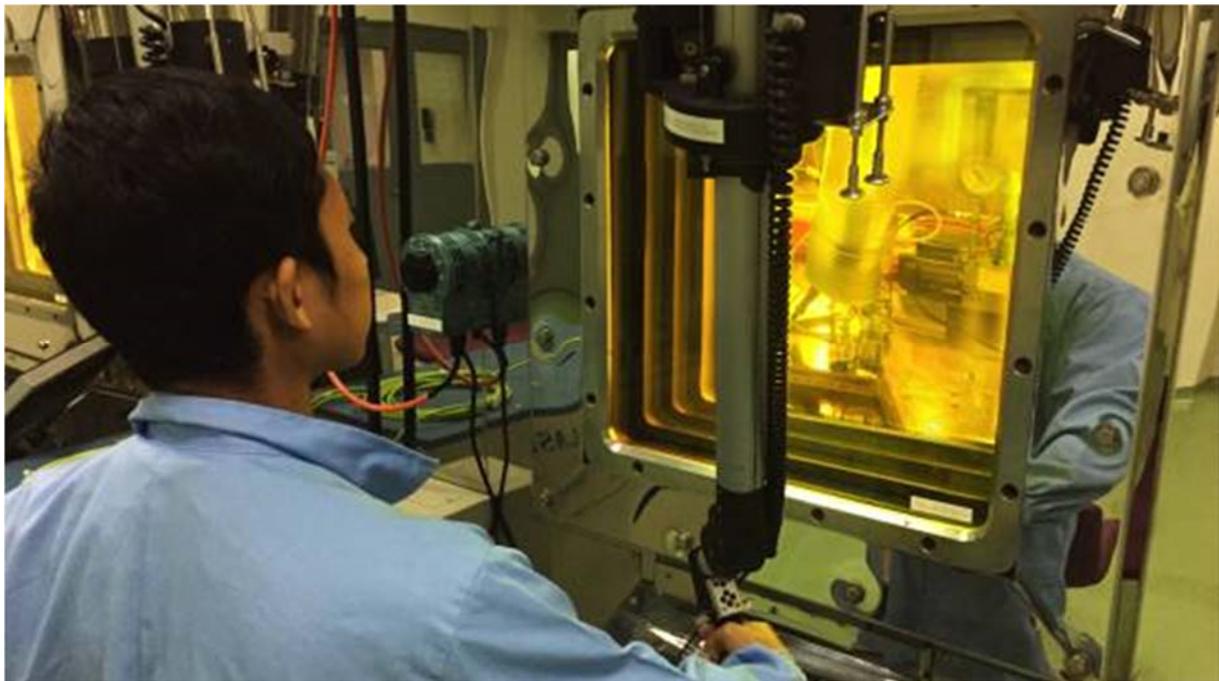


Fig. G.1. Se están produciendo radiofármacos teranósticos en al menos 80 Estados Miembros de todo el mundo, utilizando diversos radioisótopos y moléculas transportadoras.

145. En la actualidad se utilizan con éxito péptidos e inhibidores de enzimas radiomarcados con galio 68 y lutecio 177 como vectores para tumores neuroendocrinos y cáncer de próstata. Sin embargo, aún se necesita encontrar un mejor complemento de diagnóstico para el lutecio 177, es decir, un radionucleido de diagnóstico con propiedades químicas más similares que las del galio 68, así como pares de nuevos emisores alfa, beta o Auger y agentes de diagnóstico complementarios adecuados.

Tendencias

146. Para aprovechar plenamente el potencial de los pares teranósticos en medicina nuclear y mejorar la evolución del paciente, es necesario progresar en la investigación y el desarrollo de radiofármacos y radioisótopos. El objetivo es desarrollar pares de radionucleidos más adecuados, optimizar las porciones quelantes más estables y ampliar el número de vectores dirigidos específicos mediante el diseño biológico y bioquímico.

147. Los radiofármacos de lutecio 177 pueden producirse en formas con portador añadido y sin portador, ambas actualmente obtenidas en reactores de investigación. Desde 2022, el lutecio 177 sin portador añadido también puede producirse en reactores nucleares de potencia con una tecnología desarrollada por Framatome y utilizada por primera vez en el Canadá, en la central nuclear de Bruce. Debido a su período de semidesintegración medio, sus emisiones de partículas beta para el tratamiento y sus emisiones de rayos gamma para el diagnóstico por imagen, el lutecio 177 ya desempeña un papel importante en las aplicaciones de medicina nuclear y ha permitido a muchos investigadores y científicos desarrollar nuevos radiofármacos teranósticos. Habida cuenta de los avances recientes en lo que respecta a las moléculas dirigidas, como los péptidos, los fragmentos inmunológicos y las moléculas pequeñas, se están llevando a cabo en todo el mundo nuevas actividades y planes relacionados con el desarrollo de agentes.

148. Los radiofármacos teranósticos ya se han abierto camino en la oncología clínica. Sin embargo, en vista de los últimos avances en imagenología molecular, como la tomografía por emisión de positrones-tomografía computarizada (PET-TAC) y la tomografía por emisión de positrones-imagenología por resonancia magnética (PET-IRM), así como el tratamiento dirigido (utilizando emisores alfa y beta), es necesario que los profesionales sanitarios tengan a su disposición otros radioisótopos nuevos. Se están investigando nuevos pares de radioisótopos para aplicaciones teranósticas, como los radioisótopos del terbio que tienen una amplia gama de aplicaciones de diagnóstico por tomografía computarizada por emisión de fotón único y terapéuticas (terapia alfa y betaterapia) (figura G.2)



Fig. G.2. Diagrama que muestra los radioisótopos teranósticos necesarios para mejorar el desarrollo de radiofármacos. (Gráfico: OIEA, basado en el trabajo de F. Rösch, Universidad Johannes Gutenberg, Maguncia, Alemania)

149. Gracias a los avances tecnológicos en la producción de radionucleidos, la lista de radionucleidos prometedores para aplicaciones radiofarmacéuticas es cada vez mayor. Sin embargo, la administración eficaz de un radionucleido determinado a un blanco molecular en una célula sigue planteando un desafío a la hora de desarrollar radiofármacos. Se requiere una optimización de la formulación, una caracterización detallada y evaluaciones preclínicas para desarrollar e implantar sistemas nuevos y más eficientes de administración de productos teranósticos con una mejor farmacocinética y efectos secundarios mínimos.

H. Salud humana

H.1. Inteligencia artificial para la delimitación y la planificación de la radioterapia

Situación

150. La radioterapia es un pilar esencial del tratamiento oncológico, pues aproximadamente la mitad de todos los enfermos de cáncer la necesitan en algún momento. En las últimas décadas, la radioncología ha evolucionado rápidamente, con innovaciones en los equipos de radioterapia, la imagenología tridimensional y la tecnología de la información, así como un mayor conocimiento de la biología del cáncer. Las nuevas tecnologías de administración de radioterapia y las modalidades de imagenología conexas basadas en la inteligencia artificial (IA) han hecho posible una radioterapia de precisión altamente optimizada y han contribuido a mejorar el control de los tumores y la atención a los enfermos de cáncer. Según se prevé, el uso de esos instrumentos reducirá la variación entre observadores y ahorrará tiempo al personal clínico.

151. El flujo de trabajo en un tratamiento de radioterapia es un proceso complejo integrado por varios pasos, a cargo de distintos grupos de personal, que requieren mucho tiempo y repercuten en la calidad del tratamiento y, por tanto, en la evolución del paciente. Hay una escasez mundial de personal sanitario, como radioncólogos, físicos médicos y técnicos en radioterapia. El Organismo recomienda un radioncólogo por cada 250 casos de cáncer,⁹ algo que objetivamente no podrá conseguir la mayoría de los Estados Miembros en los próximos decenios. La IA podría ofrecer una solución a la creciente necesidad de recursos humanos.

152. La administración de radioterapia requiere no solo localizar el tumor con exactitud, sino también proteger los tejidos y estructuras normales para reducir al mínimo los daños y efectos secundarios. Un paso fundamental en el proceso de preparación para la radioterapia es la delimitación, durante la cual se delimitan los órganos, los tejidos normales y el tumor. Esas delimitaciones se rigen normalmente por atlas y directrices de consenso (figura H.1).

⁹ *Setting Up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects* (OIEA, 2008).



*Fig. H.1. El Organismo imparte capacitación a profesionales sanitarios de los servicios de medicina nuclear y radioterapia, incluso mediante métodos innovadores y eficaces en relación con el costo.
(Fotografía: OIEA)*

153. Hay varios instrumentos disponibles o en desarrollo que tienen por objeto hacer más eficiente el largo proceso de delimitación, como la autodelimitación a partir de delimitaciones basadas en atlas a fin de reducir su variabilidad. Un algoritmo selecciona la imagen más similar a la del paciente y, a continuación, se utiliza el registro deformable de imágenes para transferir las delimitaciones del atlas a las del paciente. Más recientemente, y a fin de desarrollar algoritmos de aprendizaje profundo basados en IA, se han empleado grandes conjuntos de datos clínicos anonimizados que contienen delimitaciones de alta calidad realizadas a pacientes.

Tendencias

154. La IA puede ser un instrumento con que potenciar la calidad, la normalización y el ahorro de tiempo en las fases que componen el flujo de trabajo de un tratamiento de radioterapia. Esto podría redundar en una administración más segura y exacta de la radiación. La IA se está extendiendo rápidamente a la atención clínica y las previsiones indican que cambiará el paradigma de la planificación de la radioterapia, que pasará de ser un proceso complejo en el que intervienen muchos grupos de especialistas a un proceso automatizado. Es fundamental que el personal sanitario reciba la capacitación necesaria para aplicar y supervisar de manera segura los sistemas conexos. También es esencial que el público en general comprenda las ventajas y los riesgos asociados.

155. La selección y la delimitación de los volúmenes blancos del cáncer y los órganos de riesgo constituyen un paso clave en la radioterapia moderna. Los conceptos y términos para la definición del volumen tumoral macroscópico (GTV), el volumen blanco clínico (CTV) y los órganos de riesgo han ido evolucionando constantemente. Por norma general, la delimitación sigue siendo manual, mientras que los flujos de trabajo de la autodelimitación pueden basarse en un atlas y una metodología de aprendizaje profundo. La autodelimitación basada en atlas se sirve de una “biblioteca” de casos de tomografía computarizada (TC) preparados y delimitados. El “aprendizaje profundo” es una técnica de aprendizaje automático que utiliza

redes neuronales profundas para crear un modelo capaz de aprender y mejorar con el tiempo y la experiencia. Existen paquetes comerciales de autodelimitación basada en atlas y en el aprendizaje profundo.

156. Si bien la autosegmentación basada en el aprendizaje profundo muestra un desempeño muy prometedor en los estudios realizados, el beneficio clínico real apenas se ha estudiado aún. Es posible que todavía haya que efectuar comprobaciones o ajustes humanos manuales en las delimitaciones y, pese a la incorporación de la autosegmentación en la práctica clínica, hay una constante necesidad de impartir capacitación y poner en práctica directrices de delimitación. La limitación que plantea el uso de la IA para la segmentación es que, en algunas situaciones, las decisiones deben basarse en algo más que la mera información de imagenología.

157. Una solución a este desafío es una inteligencia híbrida que combine los puntos fuertes tanto de la inteligencia natural como de la artificial para segmentar los órganos en las imágenes de TC empleando cinco módulos distintos.¹⁰ Con este enfoque se pueden obtener resultados similares a los que logran expertos humanos en delimitación, pero con un ahorro de tiempo notable (figura H.2).

158. En un resumen reciente del Organismo sobre la situación, los desafíos y las oportunidades en relación con la tecnología nuclear y la IA, se destaca la necesidad de definir las funciones y responsabilidades de los profesionales de la radioterapia y de proporcionar un marco claro para la selección, la puesta en marcha, la aplicación, el intercambio de datos y un proceso continuo de garantía de la calidad de las tecnologías basadas en la IA.¹¹

159. El Organismo apoyará el desarrollo de un marco destinado a orientar a los Estados Miembros en la aplicación de la IA con fines de delimitación. Como parte de este apoyo, se inició en 2022 un proyecto coordinado de investigación destinado a investigar la eficacia de las intervenciones de aprendizaje electrónico por lo que respecta a las competencias de delimitación basadas en la IA en radioterapia, especialmente para el cáncer de cabeza y cuello. Si bien sigue preocupando la posible pérdida de conocimientos entre médicos, físicos médicos o técnicos en radioterapia, la IA parece estar trayendo consigo una mejora de la calidad y un uso más eficiente del tiempo. Dada la escasez mundial de personal oncológico, sería un avance muy oportuno que, con la debida reglamentación, la IA adquiriera mayor relevancia en la delimitación.

¹⁰ Udupa J. K., Liu T., Jin C., et ál. “Combining natural and artificial intelligence for robust automatic anatomy segmentation: Application in neck and thorax auto-contouring”, *Medical Physics* (2022).

¹¹ *Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology* (OIEA, Viena, 2022).

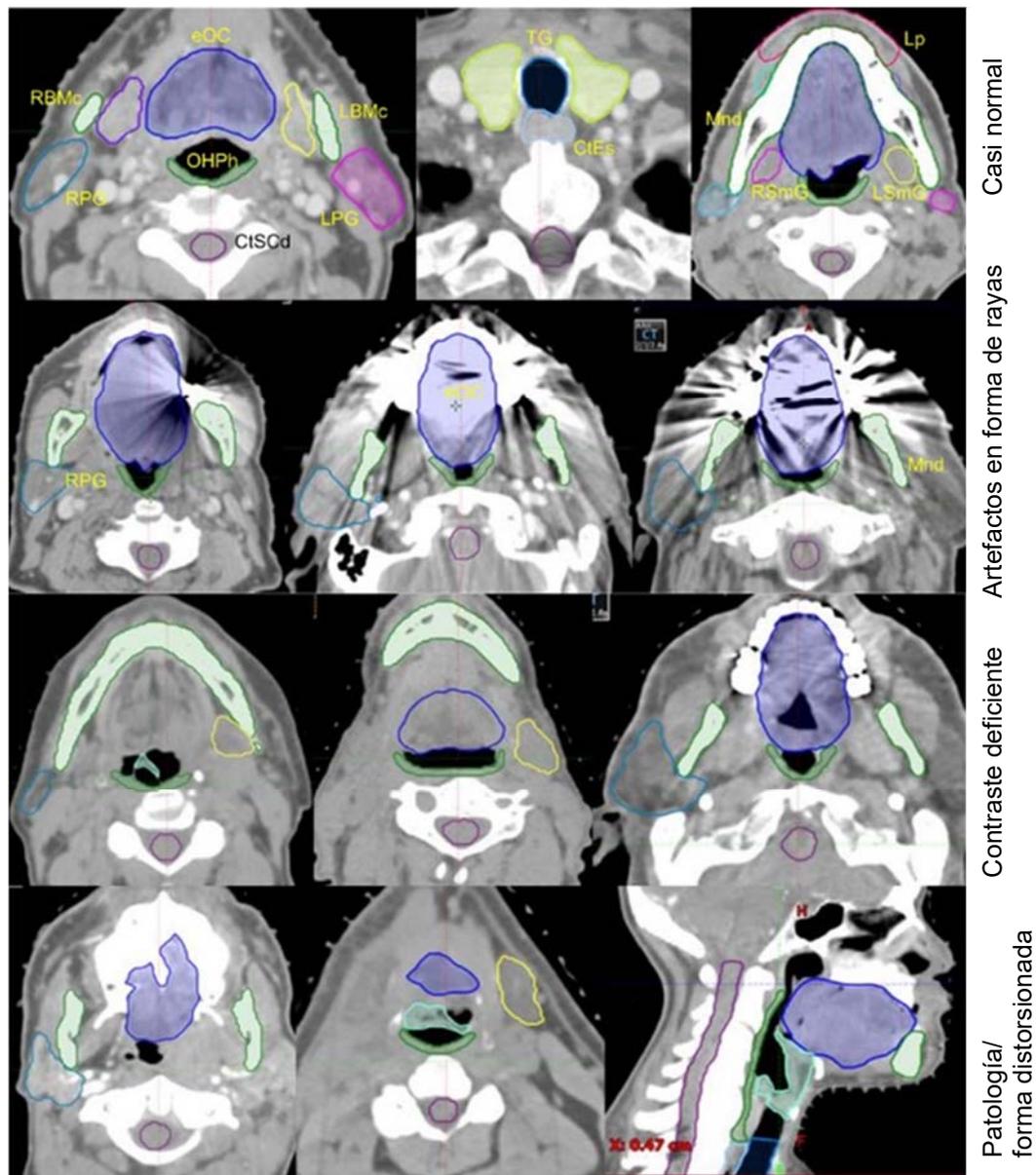


Fig. H.2. Exploraciones de cuello mediante TC con desviaciones de la calidad de imagen, como artefactos en forma de rayas, contraste deficiente y formas distorsionadas, que pueden plantear dificultades. En esas situaciones, la inteligencia híbrida puede ser un enfoque eficaz para la delimitación en radioterapia. (Fotografía: Medical Physics, 2022)

I. Medio ambiente marino

I.1. Contaminantes emergentes

Situación

160. Se calcula que en todo el mundo se fabrican más de 140 000 sustancias químicas sintéticas, con un desarrollo continuo de nuevas sustancias químicas antropogénicas. Según se prevé, de aquí a 2050 se triplicarán la frecuencia de uso y los elevados volúmenes de producción de estas sustancias, que pueden

dañar los ecosistemas y la salud humana. Un puñado de estas sustancias químicas, a menudo denominadas sustancias prioritarias, están reguladas y sometidas a monitorización en el medio marino por parte de los Estados Miembros. Sin embargo, solo una pequeña parte de los efectos tóxicos observados en el medio acuático puede atribuirse a la presencia de estas sustancias prioritarias conocidas.¹²

161. En este contexto suscitan cada vez más preocupación los contaminantes emergentes (CE), sustancias detectadas en el medio ambiente que no están abarcadas en los programas de vigilancia reglamentaria. Poco se sabe del destino y los efectos biológicos de los CE, si bien se conocen algunos de sus efectos adversos para los ecosistemas y la salud humana y se sospecha de la existencia de otros. Entre los CE figuran plastificantes, piroretardantes, compuestos fluorados “antiadherentes” (a menudo denominados “sustancias químicas para siempre”), pesticidas y productos farmacéuticos o de cuidado personal. El tratamiento de aguas negras industriales y domésticas, los lixiviados de vertederos, las escorrentías de aguas superficiales, el estiércol y los biosólidos empleados en terrenos agrícolas, así como la deposición atmosférica, son fuentes de CE en el medio acuático (figura I.1). Las sustancias que persisten durante mucho tiempo y, además, se bioacumulan en los organismos y tienen propiedades tóxicas son especialmente preocupantes para la salud de los ecosistemas marinos.

162. Los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente Marino, situados en Mónaco, vienen desarrollando métodos analíticos destinados específicamente a determinados compuestos de grupos de CE presentes en diversos compartimentos marinos como el agua, los sedimentos y la biota. El uso de análogos marcados isotópicamente de estos CE específicos durante todo el proceso analítico, junto con técnicas de detección por espectrometría de masas, permite medir estos contaminantes con exactitud, a nivel de trazas y ultratrazas. Estos métodos, conocidos como “análisis por dilución isotópica”, son esenciales para caracterizar la presencia y la distribución de amenazas químicas conocidas y emergentes en redes alimentarias marinas y alimentos de origen marino, especialmente en regiones poco estudiadas, a fin de aportar pruebas científicas a los responsables de adoptar decisiones.

163. Sin embargo, hay claras señales que advierten de una “pandemia silenciosa”. El problema que plantea el creciente número de nuevas sustancias químicas sintéticas que se van introduciendo en el mercado mundial se ve agravado por las lagunas de conocimiento sobre sus identidades químicas. Además, pese al creciente conjunto de pruebas que muestran la ubicuidad de estas sustancias químicas en el medio acuático, faltan medidas de monitorización, evaluación y gestión.

¹² Véase Brack, W., Klamer, H.J.C., Alda, M.L.D. y Barcelo, D., “Effect-directed analysis of key toxicants in European river basins: A review”, *Environmental Science Pollution Research*, Vol. 14(1) (2007).



*Fig. I.1. Cada vez se libera un mayor número de nuevas sustancias químicas sintéticas al medio ambiente. Las técnicas innovadoras de muestreo y cribado analítico del agua pueden ayudar a los científicos a determinar y cuantificar los efectos de estos contaminantes en los ecosistemas y la salud humana.
(Gráfico: Rudzhan/stock.adobe.com, modificado por el OIEA)*

Tendencias

164. Se están desarrollando estrategias más holísticas para monitorizar los contaminantes químicos conocidos y detectar nuevas sustancias potencialmente nocivas en el medio marino. La combinación de innovadores instrumentos de muestreo del agua con avances en las técnicas de espectrometría de masas permite cribar con mayor precisión un gran número de contaminantes conocidos o de cuya existencia se tienen sospechas e identificar sustancias químicas desconocidas.

165. El advenimiento de técnicas de muestreo pasivo, como instrumentos para monitorizar la calidad del agua fiables, sólidos y eficaces en relación con el costo, ofrece una solución especialmente atractiva para hacer frente a algunos de los desafíos de la contaminación química propios del medio acuático. Los dispositivos de muestreo pasivo constan sencillamente de un único material, como una lámina de caucho de silicona, o de un material fijado detrás de membranas permeables para acumular los contaminantes químicos una vez que se despliegan en el medio acuático (figura I.2).



Fig. I.2. Dispositivos de muestreo pasivo listos para ser desplegados en el mar (fotografía: Centro de Ciencias Ambientales, Pesqueras y Acuícolas del Reino Unido)

166. Los dispositivos de muestreo pasivo pueden tomar continuamente muestras de cuerpos de agua durante períodos que van de varios días a varios meses. Ello permite la acumulación de contaminantes químicos a niveles que multiplican por varios millares los que suelen medirse en el agua, facilitando así la detección cuando el muestreo instantáneo tradicional de pequeños volúmenes no es lo suficientemente sensible.

167. Gracias a esos isótopos estables en forma de compuestos de referencia deuterados y marcados con carbono 13 cargados en esos tomamuestras pasivos antes de ser desplegados, se pueden cuantificar con exactitud los volúmenes de agua muestreados y realizar mediciones de contaminantes integradas en el tiempo. Los dispositivos de muestreo pasivo también tienen la ventaja de tomar muestras solo de la fracción libremente disuelta de las sustancias químicas presentes en la fase acuosa, lo cual proporciona una representación más precisa de los contaminantes biodisponibles que podrían ser absorbidos por los organismos. Estos dispositivos pueden utilizarse incluso para detectar específicamente contaminantes orgánicos que pueden bioacumularse en las redes alimentarias marinas.

168. Cuando se combinan con instrumentación analítica de última generación basada en separación cromatográfica y espectrometría de masas de alta resolución y gran exactitud, los tomamuestras pasivos pueden detectar miles de sustancias químicas presentes en el medio marino y facilitar la identificación de compuestos hasta entonces desconocidos. Pueden ser sistemas de alerta temprana muy eficaces por lo que respecta a los CE en el medio marino, emplearse en regiones remotas o poco estudiadas y transportarse fácilmente a los laboratorios de análisis.

169. Estos avances en el muestreo del agua y las técnicas avanzadas de cribado analítico pueden servir como nuevos y potentes instrumentos para afrontar algunos de los desafíos planteados por las complejas mezclas de CE presentes en el medio marino. Esos logros ayudarán a colmar las lagunas de conocimiento existentes con respecto a la presencia de contaminantes químicos artificiales, su desplazamiento a través de los ecosistemas y su posterior impacto en las funciones de los ecosistemas marinos, con el objetivo de garantizar que la liberación de esos contaminantes al medio marino pueda gestionarse tan pronto como sea posible.

I.2. Nuevos radiotrazadores de la circulación oceánica para mejorar la comprensión y la modelización del transporte de contaminantes y del cambio oceánico y climático

Situación

170. En las últimas décadas se ha liberado al océano un amplio conjunto de radionucleidos. Su distribución espacial y temporal puede ser bastante compleja, pero siempre está vinculada a cuatro procesos generales: la función/fuente de entrada, el decaimiento radiactivo, la biogeoquímica y los procesos oceánicos. Como los radionucleidos se transportan a través de la atmósfera y la hidrosfera por varias vías físicas, químicas y biológicas, al observar cómo evoluciona su distribución oceánica se obtiene información única sobre la naturaleza y las magnitudes de los procesos en juego.

171. Desde la década de 1940 se vienen introduciendo radionucleidos artificiales en el medio marino a través de diversas actividades, entre ellas la generación de energía nucleoelectrónica y el desarrollo, la producción y los ensayos de armas nucleares. Desde entonces se han ido registrando meticulosamente las emisiones de radionucleidos artificiales, y se han llevado a cabo numerosas investigaciones con objeto de examinar el transporte y destino de estos en el medio marino y emplearlos como trazadores para comprender mejor diversos procesos marinos y oceánicos. Ese conocimiento puede servir como base para evaluar las consecuencias adversas para el medio ambiente o la salud humana y para hacer valoraciones rápidas del impacto de futuras emisiones de radionucleidos, especialmente las no previstas.

172. Puesto que la introducción de estas sustancias es diversa, tanto desde el punto de vista histórico como geográfico, y que sus comportamientos medioambientales varían, cada trazador arroja luz sobre una parte distinta de la gama de procesos de transporte oceánico (figura I-3). Estos atributos, junto con una serie de características geoquímicas como el período de semidesintegración y la afinidad de las partículas, hacen que los radionucleidos introducidos artificialmente sean medios sumamente útiles para comprender mejor los patrones oceánicos y rastrear los contaminantes.

Circulación termohalina



Fig. I.3. La circulación termohalina, también denominada cinta transportadora oceánica global, es un importante mecanismo que impulsa el movimiento y la mezcla de agua en todo el océano. Los radiotrazadores pueden utilizarse para rastrear el movimiento del agua de mar. (Gráfico: Observatorio de la Tierra de la NASA, modificado por el OIEA)

173. El uso de radiotrazadores en las técnicas nucleares, como el cálculo de decaimiento/masa y la activación mediante reacciones nucleares, también es un recurso de incalculable valor para comprender los ecosistemas marinos y costeros. Dichas técnicas permiten monitorizar la captación y la bioamplificación de contaminantes radiactivos y no radiactivos, como los microplásticos y el metilmercurio. Estas tecnologías se usan también para identificar el origen, rastrear vías y entender el destino de la contaminación marina por microplásticos por conducto de proyectos en el marco de la iniciativa NUTEC Plastics (TECnología Nuclear para el Control de la Contaminación por Plásticos) del Organismo. Asimismo, ayudan a detectar y cuantificar la presencia de biotoxinas en los alimentos de origen marino, a evaluar el impacto de la acidificación de los océanos en los organismos calcificadores y a valorar los procesos metabólicos con las temperaturas en aumento.

174. A medida que se amplían los conjuntos de datos a nivel mundial, la modelización de los ecosistemas marinos es un importante enfoque analítico para la integración de conocimientos, datos e información a fin de comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas y la migración y el transporte de contaminantes. Los radionucleidos artificiales desempeñan un papel importante para ayudar a comprobar la validez de estos modelos, en la medida en que aportan datos de medición de la realidad de campo. Para prever el impacto humano en el medio ambiente y adoptar decisiones acertadas en materia de políticas sobre las actividades futuras, es preciso comprender los procesos por los que se lleva a cabo el transporte en el océano.

Tendencias

175. Los albores de las mediciones marinas estuvieron caracterizados por datos escasos y, en ocasiones, carentes de fiabilidad. Las técnicas sofisticadas y la nueva tecnología trajeron consigo la posibilidad de medir concentraciones mínimas de material, pero también problemas logísticos relacionados con muestras de gran volumen y posibles cuestiones de contaminación cruzada grave.

176. Dado que las muestras ambientales suelen presentar un nivel bajo de radionucleidos y las muestras de que se dispone son de pequeño tamaño, se han tenido que desarrollar técnicas eficientes. Pasar de contar el número de decaimientos radiactivos a contar átomos mediante métodos de espectrometría de masas, como la espectrometría de masas con aceleradores (AMS), la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción, la espectrometría de masas con ionización por resonancia, la espectrometría de masas de iones secundarios y la espectrometría de masas de ionización térmica, supone un importante cambio de paradigma en la tecnología radioanalítica.

177. Los importantes avances recientes en AMS por lo que respecta a la eficiencia de detección y la supresión de isóbaros también han abierto posibilidades para el análisis de otros radionucleidos de período largo en concentraciones ambientales ultrabajas (figura I-4).



*Fig. I.4. Despliegue de un nucleador múltiple para recopilar muestras de sedimentos inalterados a fin de analizar contaminantes y signos de cambio climático. Los sedimentos conservan información cronológica, y para datar acontecimientos pasados registrados en estos archivos naturales se utilizan radiotrazadores.
(Fotografía: OIEA)*

178. Los largos períodos de semidesintegración del tecnecio 99, el yodo 129, el uranio 236, el neptunio 237, el plutonio 239 y el plutonio 240 hacen que sean importantes para las aplicaciones de los trazadores oceanográficos que ayudan a estudiar los procesos de circulación a gran escala. Los estudios sobre los procesos de transporte de masas de agua han puesto el yodo 129 y el uranio 236 en el punto de mira dadas su solubilidad en el agua de mar y la posibilidad de detectarlos a concentraciones extremadamente bajas gracias a los nuevos avances en las técnicas de medición. A diferencia de las técnicas convencionales de espectrometría de masas, los sistemas de AMS determinan las concentraciones a partir de muestras de agua de mar de pequeño volumen, tras aplicar procedimientos químicos sencillos

y rápidos con límites de detección muy competitivos (es decir, razones atómicas de yodo 129/yodo 127 y uranio 236/uranio 238 de 10^{-13} o inferiores).

179. Las tecnologías radioanalíticas ultrasensibles siempre han desempeñado un papel clave en las ciencias marinas. Los avances que se registren en las nuevas tecnologías de recuento de átomos individuales abrirán nuevas y apasionantes posibilidades de investigación científica.

180. Está habiendo novedades prometedoras en materia de técnicas analíticas ultrasensibles basadas en láser, detección de isótopos ultratraza de gases nobles, fuentes de iones positivos para aceleradores tandem y tecnologías de trampas de iones. Los avances en las tecnologías analíticas seguirán favoreciendo el paso de los análisis volumétricos de muestras a los análisis isotópicos por compuesto con acoplamiento en línea de instrumentos analíticos. Esos adelantos permitirían disponer de una tecnología de recuento de átomos individuales aplicable a muchos radionucleidos, lo cual supondría un gran logro en el análisis ultrasensible de radionucleidos marinos.

Anexo

Cuadro A-1. Situación de la energía nucleoelectrónica en el mundo — 2022 ^a

País	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2022		Experiencia operacional total hasta 2022	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidades	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
Alemania	3	4 055			31,9	5,8	834	8
Argentina	3	1 641	1	25	7,5	5,4	97	2
Armenia	1	416			2,6	31,0	55	3
Bangladesh			2	2 160				
Belarús	1	1 110	1	1 110	4,4	11,9	2	2
Bélgica	6	4 936			41,7	46,4	324	4
Brasil	2	1 884	1	1 340	13,7	2,5	63	3
Bulgaria	2	2 006			15,8	32,5	173	3
Canadá	19	13 624			81,7	12,9	903	0
China	54	52 181	20	20 284	395,4	5,0	513	2
Corea, República de	25	24 489	3	4 020	167,5	30,4	644	9
Egipto			2	2 200				
Emiratos Árabes Unidos	3	4 011	1	1 310	19,3	6,8	4	0
Eslovaquia	4	1 868	2	880	14,8	59,2	184	7
Eslovenia	1	688			5,3	42,8	41	3
España	7	7 123			56,2	20,3	368	2
Estados Unidos de América	92	94 718	2	2 234	772,2	18,2	4 825	9
Federación de Rusia	37	27 727	3	2 700	209,5	19,6	1 447	7
Finlandia	5	4 394			24,2	35,0	176	2
Francia	56	61 370	1	1 630	282,1	62,6	2 449	0
Hungría	4	1 916			15,0	47,0	150	2
India	19	6 290	8	6 028	42	3,1	594	11
Irán, República Islámica del	1	915	1	974	6,0	1,7	11	4
Japón	10	9 486	2	2 653	51,9	6,1	2 020	6
México	2	1 552			10,5	4,5	61	11
Países Bajos	1	482			3,9	3,3	78	0
Pakistán	6	3 262			22,2	16,2	98	9
Reino Unido	9	5 883	2	3 260	43,6	14,2	1 658	9
República Checa	6	3 934			29,3	36,7	188	10
Rumania	2	1 300			10,2	19,3	41	11
Sudáfrica	2	1 854			10,1	4,9	76	3
Suecia	6	6 937			50,0	29,5	486	0
Suiza	4	2 973			23,2	36,4	236	11
Türkiye			4	4 456				
Ucrania ^e	15	13 107	2	2 070	N.D.	N.D.	563	6
A nivel mundial ^{b,c}	438 ^d	393 823 ^d	58	59 334	2 486,6	N.D.	19 764	11

Nota: N.D. - No disponible.

^a Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<https://pris.iaea.org/pris/>), según los datos proporcionados por los Estados Miembros hasta finales de junio de 2023.

^b Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 3 unidades en funcionamiento, 2859 MW(e) y 22,9 TW·h de electricidad suministrada, lo que representa el 9,1 % del total de la matriz de electricidad.

^c La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses) y Lituania (43 años y 6 meses), y las centrales en funcionamiento y en régimen de parada de Taiwán (China) (239 años y 8 meses).

^d Los totales incluyen datos de unidades cuyo funcionamiento se mantuvo en suspenso: India (4 unidades; 639 MW(e)) y Japón (23 unidades; 22 193 MW(e)).

^e La producción total de electricidad no incluye las unidades del reactor de Ucrania, ya que para 2022 no se presentaron datos operativos antes de la publicación.

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

Tipo de aplicación ^a	Número de reactores de investigación implicados ^b	Número de Estados Miembros que tienen esas instalaciones
Enseñanza/capacitación	161	51
Análisis por activación neutrónica	116	50
Producción de radioisótopos	82	41
Imagenología 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	12
Suministro de datos nucleares	16	9
Otras ^c	116	34

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

^b De un total de 233 reactores de investigación examinados (223 en funcionamiento y 10 en régimen de parada temporal a diciembre de 2022).

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

Lista de abreviaciones

AGR	reactor avanzado refrigerado por gas
ALFRED	Reactor rápido Avanzado Europeo de Demostración Refrigerado por Plomo
ALPS	Sistema Avanzado de Procesamiento de Líquidos
AMS	espectrometría de masas con aceleradores
ANSTO	Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear
BNCT	terapia por captura neutrónica en boro
CE	contaminantes emergentes
combustible TRISO	combustible tri-isotrópico
COVID-19	enfermedad coronavírica de 2019
CP27	Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022
CTV	volumen blanco clínico
D10	dosis de reducción decimal
DEMO	central de demostración de la fusión
DOE	Departamento de Energía
DSRS	fuelle radiactiva sellada en desuso
EDXRF	fluorescencia de rayos X por energía dispersiva
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GC-IMS	cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica
GTV	volumen tumoral macroscópico
GW	gigavatio
GW(e)	gigavatio (eléctrico)
HPR1000	Hualong 1
HTR-PM	reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura
I+D	investigación y desarrollo
IA	inteligencia artificial
ID&D	investigación, desarrollo y demostración
IFMIF	Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión
INIR	Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear
keV	kiloelectronvoltio
KP-FHR	reactor de alta temperatura Kairos Power refrigerado por sales de fluoruro
KSTAR	tokamak superconductor avanzado de investigación de Corea
LFR	reactor rápido refrigerado por plomo
LIDAR	detección y localización por ondas luminosas
LILW	desechos de actividad baja e intermedia
LLNL	Laboratorio Nacional Lawrence Livermore

LWR	reactor de agua ligera
MeV	megaelectronvoltio
MHTGR	reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas
MMR	microrreactor modular
MOX	mezcla de óxidos
MSFR	reactor rápido de sales fundidas
MSR	reactor de sales fundidas
MW(e)	megavatio (eléctrico)
NHSI	Iniciativa de Armonización y Normalización Nuclear
NIF	Instalación Nacional de Ignición
NORM	material radiactivo natural
NPPA	Autoridad de Centrales Nucleares
PCI	proyecto coordinado de investigación
PET	tomografía por emisión de positrones
PRIS	Sistema de Información sobre Reactores de Potencia
PWR	reactor de agua a presión
SCWR	reactor supercrítico refrigerado por agua
SFR	reactor rápido refrigerado por sodio
SMART	reactor modular avanzado integrado
SMR	reactores pequeños y medianos o modulares
STEP	Tokamak Esférico para la Producción de Energía
t HM	toneladas de metal pesado
TC	tomografía computarizada
TW·h	teravatio-hora
UE	Unión Europea
UME	uranio muy enriquecido
UPE	uranio poco enriquecido
WCR	reactor refrigerado por agua