



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Átomos para la paz y el desarrollo

**Junta de Gobernadores
Conferencia General**

GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6

Distribución general

Español

Original: inglés

Solo para uso oficial

SITUACIÓN Y PERSPECTIVAS INTERNACIONALES DE LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA-2021

Informe del Director General

Solo para uso oficial

Punto 18 del orden del día provisional de la Conferencia
(GC/65/1 y Add.1)

Situación y Perspectivas Internacionales de la Energía Nucleoeléctrica - 2021

Informe del Director General

Resumen

- En su resolución GC(50)/RES/13, la Conferencia General pidió a la Secretaría que presentara cada dos años un informe exhaustivo sobre la situación y las perspectivas internacionales de la energía nucleoeléctrica, a partir de 2008. En su resolución GC(60)/RES/12, aprobada en septiembre de 2016, la Conferencia General pidió a la Secretaría que siguiera publicando el informe titulado “Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoeléctrica” cada cuatro años, a partir de 2017. El presente informe se ha elaborado en respuesta a la resolución GC(60)/RES/12.

Situación y Perspectivas Internacionales de la Energía Nucleoeléctrica - 2021

Informe del Director General

A. Energía limpia para el clima y el desarrollo: contexto socioeconómico

A.1. El contexto en evolución

1. Desde la publicación de “Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrica - 2017” (documento GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8), se han producido importantes acontecimientos nacionales e internacionales que ponen de relieve el papel de la energía nucleoelectrica para mitigar el cambio climático y lograr el desarrollo sostenible. En esta sección se destacan algunos de los acontecimientos más importantes por lo que respecta a la situación y las perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrica.

A.1.2. Acontecimientos internacionales

2. Cada vez se reconoce más a nivel mundial que el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos (Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 de las Naciones Unidas) resulta fundamental para alcanzar prácticamente todos los ODS restantes (16). Los ODS, aprobados por dirigentes del mundo en septiembre de 2015, exhortan a todos los países a que, de aquí a 2030, movilicen esfuerzos para poner fin a todas las formas de pobreza, combatir las desigualdades y hacer frente al cambio climático. Esos esfuerzos irán acompañados de estrategias que promuevan el crecimiento económico y respondan a necesidades sociales como la educación, la salud, la protección social y las oportunidades de empleo, abordando al mismo tiempo el cambio climático y la protección del medio ambiente. De acuerdo con el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (DAES), que presta servicios de secretaría a los ODS, el ODS 7 resulta crucial para alcanzar casi todos los demás ODS, desde la erradicación de la pobreza, mediante avances en la salud, la educación, el suministro de agua y la industrialización, hasta la mitigación del cambio climático. Esa misma cuestión ha sido afirmada reiteradamente por la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), que en marzo de 2018 afirmó que la energía ocupa un lugar central en muchos de estos Objetivos de Desarrollo Sostenible: desde la ampliación del acceso a la electricidad hasta la mejora de los combustibles limpios para cocinar, desde la reducción de las subvenciones energéticas que supongan un derroche hasta la reducción de la contaminación atmosférica letal que mata prematuramente a millones de personas en todo el mundo.

3. Se estima que, en los últimos 50 años, se han logrado evitar efectivamente entre 70 gigatoneladas (Gt) y 78 Gt de dióxido de carbono (CO₂) mediante el uso de energía nucleoelectrica, una cantidad que varía según las tecnologías que se hubieran desplegado en caso de no haberse construido centrales

nucleares. Calcular las emisiones que se han evitado gracias a las centrales nucleares existentes resulta complejo, pues la alternativa a la energía nucleoelectrica podría variar entre gas y una combinación de gas y energías renovables. Entre 1970 y 2010, las alternativas claras a la energía nucleoelectrica eran el petróleo, el carbón y, más adelante, el gas. Los países que despliegan energía nuclear a gran escala, como Francia y Suecia, lograron descarbonizar su matriz de electricidad en un plazo de 20 a 30 años. En 2019, el 10,4 % de la electricidad mundial provenía de la energía nucleoelectrica, con 2657 teravatios-hora (Tw-h) de electricidad con bajas emisiones de carbono. Si ese volumen de generación procediera del gas, se habrían emitido 1,5 Gt de CO₂. Los análisis del ciclo de vida de las tecnologías de generación de electricidad muestran que la energía nucleoelectrica es una de las de menor intensidad carbónica, con un nivel equiparable al de la energía hidroelectrica y la eólica. La energía nucleoelectrica sigue siendo una opción clave para descarbonizar el sector eléctrico en los próximos decenios, junto con energías renovables variables como la eólica y la solar fotovoltaica.

Impacto del carbono

Contribución nuclear

La energía nucleoelectrica ha ayudado a evitar

entre **70_{Gt}** y **78_{Gt}** de **CO₂** en los últimos 50 años.

4. En el plano internacional, se ha venido reconociendo, cada vez más, el importante papel que desempeña la energía nucleoelectrica en la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible. Muchas organizaciones nacionales e internacionales han analizado las necesidades de descarbonizar el sistema energético en consonancia con el logro de los objetivos del Acuerdo de París; y muchos de sus escenarios instan a incrementar considerablemente la capacidad nucleoelectrica mundial, entre ellos los cuatro escenarios ilustrativos descritos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su documento de 2018 titulado *Calentamiento global de 1,5 °C*. De hecho, para lograr el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5 °C, los cuatro escenarios ilustrativos del IPCC instan a incrementar la capacidad nucleoelectrica entre un 60 % y un 500 % de aquí a 2050. Al mismo tiempo, la energía nucleoelectrica se percibe cada vez más como una importante opción para que el mundo en desarrollo atienda la creciente demanda y mejore el nivel de vida sin aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo con el escenario de desarrollo sostenible de la AIE, que figura en su *World Energy Outlook* de 2019, para que el mundo tenga una posibilidad razonable de cumplir los objetivos de lucha contra el cambio climático, así como otros ODS relacionados con la energía, es preciso ampliar significativamente la energía nucleoelectrica más allá de sus mercados históricos hacia los países en fase de incorporación al ámbito nuclear, incluidos los países en desarrollo, y también más allá del sector eléctrico.

Escenarios del IPCC

Contribución nuclear

Para lograr el objetivo de 1,5 °C, 4 escenarios ilustrativos del IPCC

instan a incrementar la capacidad



entre un **60 %** y un **500 %**

de aquí a 2050.

5. En octubre de 2019, el Organismo organizó su Primera Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nucleoeléctrica. El evento, que atrajo a más de 500 participantes de 79 Estados Miembros y 17 organizaciones internacionales, reunió por primera vez a los jefes de las principales organizaciones internacionales en materia de energía y cambio climático (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, IPCC, AIE y DAES de las Naciones Unidas) para analizar el papel de la energía nucleoeléctrica en la lucha contra el calentamiento global. Según declaró en su resumen final el Presidente de la Conferencia, Mikhail Chudakov, Director General Adjunto y Jefe del Departamento de Energía Nuclear, la energía nucleoeléctrica puede desempeñar un papel importante en la descarbonización del sector energético para lograr los objetivos climáticos mundiales, pero se necesitarán políticas propicias para que alcance su pleno potencial.

6. En su informe de mayo de 2019 titulado *Nuclear Power in a Clean Energy System*, la AIE advirtió que si no se adoptaban decisiones oportunas sobre la energía nucleoeléctrica se incrementarían los costos de la transición hacia la energía limpia y, al mismo tiempo, sería mucho más difícil alcanzar los objetivos de emisiones netas cero. La AIE reiteró esa misma cuestión en su informe de referencia titulado *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, publicado en mayo de 2021, en el que se describe una posible vía para que, de aquí a mediados de siglo, el mundo acabe con las emisiones de gases de efecto invernadero. En dicho informe se prevé que la capacidad de generación nucleoeléctrica prácticamente se duplicará para 2050, con una tasa anual de conexión a la red que en unos años rondará los 30 gigavatios, aunque el porcentaje de la producción mundial de electricidad que le corresponde a la energía nucleoeléctrica se reduzca ligeramente hasta el 8 % en 2050. Conforme a este escenario de emisiones netas cero, en 2050 el resto de la matriz de electricidad estará dominada por fuentes renovables, sobre todo la solar y la eólica. Ahora bien, la AIE también señaló en un informe reciente titulado *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* que las tecnologías eólica, solar y de baterías dependen en gran medida de minerales esenciales, cuya disponibilidad podría ralentizar el despliegue de dichas tecnologías. La energía nucleoeléctrica es, por otra parte, junto con la energía hidroeléctrica, una de las tecnologías con bajas emisiones de carbono de menor intensidad mineral.

7. En un informe publicado en septiembre de 2018, la Iniciativa de Energía del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) instó a incrementar notablemente la capacidad de generación nuclear mundial para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero. Con miras a lograr este aumento, en el informe se exponían a grandes rasgos políticas conforme a las cuales se establecerían condiciones más equitativas para que la energía nucleoeléctrica pudiera competir con otras tecnologías con bajas emisiones de carbono, así como las medidas necesarias para reducir el costo de los proyectos nucleares de nueva construcción. Al igual que el informe de la AIE, el estudio del MIT llegó a la conclusión de que sin una contribución importante de energía nucleoeléctrica distribuible, la transición a la energía limpia sería mucho más cara y más difícil de alcanzar.

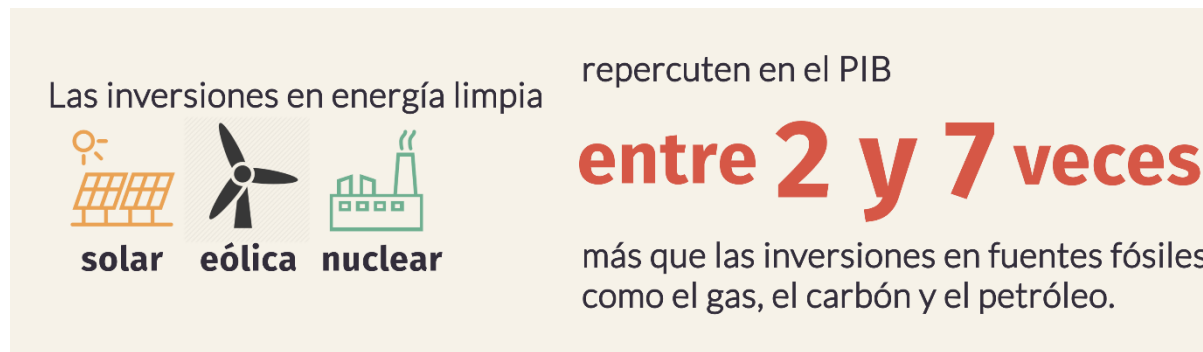
8. Según el informe de diciembre de 2020 titulado *Projected Costs of Generating Electricity*, preparado conjuntamente por la AIE y la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, ampliar la vida operacional de las centrales nucleares existentes es la inversión más eficaz con relación al costo en cuanto a generación de electricidad con bajas emisiones de carbono. En el informe se señaló que si bien la energía hidroeléctrica puede proporcionar contribuciones similares a costos comparables, no deja de depender en gran medida de los recursos naturales de cada país.

9. De acuerdo con un informe de marzo de 2021 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, la energía nuclear es un “instrumento indispensable” para alcanzar los ODS, con un papel decisivo de cara a suministrar energía asequible, mitigar el cambio climático, poner fin a la pobreza y al hambre, generar crecimiento económico y brindar innovación industrial y agua limpia. Según el informe titulado *Application of the United Nations Framework Classification for Resources and the United Nations Resource Management System: Use of Nuclear Fuel Resources for Sustainable Development – Entry Pathways*, la energía nuclear fiable puede ser una pieza fundamental de los sistemas energéticos

descarbonizados para aquellos países que aspiren a cumplir los objetivos en materia de cambio climático y desarrollo sostenible.

10. En una evaluación técnica de marzo de 2021, el Centro Común de Investigación (CCI), es decir, el servicio científico interno de la Comisión Europea, afirmó que no hay pruebas científicas que indiquen que la energía nuclear es más perjudicial para la salud humana o el medio ambiente que otras tecnologías de producción eléctrica (con bajas emisiones de carbono) ya incluidas en la Taxonomía de la Unión Europea como actividades que apoyan la mitigación del cambio climático. Esta evaluación se llevó a cabo respetando el criterio de “no causar un perjuicio significativo” fijado en el Reglamento sobre la Taxonomía de la Unión Europea, que establece el marco para facilitar las inversiones sostenibles y acabará por sentar las bases para ampliar las inversiones en energía con bajas emisiones de carbono en toda la Unión Europea. En el informe del CCI se citaron datos de 2016 que muestran que, al evaluar su impacto en la salud, la energía nucleoelectrica presenta muy buenos resultados en comparación con otras fuentes de energía, tomando como medida los años de vida ajustados por discapacidad de la carga de morbilidad general, expresados como el número total de años perdidos por mala salud, discapacidad o muerte prematura.

11. De acuerdo con un documento de trabajo publicado por el Fondo Monetario Internacional (FMI) en marzo de 2021, titulado *Building Back Better: How Big Are Green Spending Multipliers?*, las inversiones en fuentes de energía limpia, como la solar, la eólica y la nuclear, repercuten sobre el producto interno bruto (PIB) entre dos y siete veces más que las inversiones en fuentes fósiles como el gas, el carbón y el petróleo. En ese documento se afirmaba que la energía nucleoelectrica era la fuente de energía limpia con mayor efecto multiplicador económico, y se añadía que genera en torno a un 25 % más de empleo por unidad de electricidad que la energía eólica, y que los trabajadores del sector nuclear ganan un tercio más que los de la industria de las energías renovables.



B. La energía nucleoelectrica en la actualidad

12. Al final de 2020 la capacidad nucleoelectrica total del mundo ascendía a 392,6 GW(e)¹, generados por 442 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 32 países. Los países demostraron adaptabilidad a la pandemia de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) con la adopción de medidas eficaces, lo cual denota una sólida cultura institucional. Al inicio de la pandemia, a principios de 2020, el Organismo estableció la Red sobre la Experiencia Operacional de las Centrales Nucleares en relación con la COVID-19, a fin de intercambiar información sobre las medidas adoptadas para mitigar

¹ Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a 1000 millones de vatios de energía eléctrica. Todos los datos sobre reactores nucleares de potencia se corresponden con la información comunicada al Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del OIEA a 1 de junio de 2021.

la pandemia y el impacto de esta en la explotación de centrales nucleares. Ninguno de los 32 países con centrales nucleares en funcionamiento comunicó algún suceso operacional causado por la pandemia que repercutiera sobre el funcionamiento seguro y fiable de una central nuclear.

Al final de 2020,
la capacidad nucleoelectrica mundial era de 392,6 GW(e)
con **442** reactores nucleares de potencia en explotación en
32 países.

13. En 2020 la energía nucleoelectrica suministró 2553,2 teravatios-hora de electricidad libre de emisiones de GEI, que supuso en torno al 10 % de la generación planetaria de electricidad y casi un tercio de la producción mundial de electricidad con bajas emisiones de carbono.

14. Se conectaron a la red unos 5,5 GW(e) de nueva capacidad nuclear procedentes de cinco reactores de agua a presión (PWR) nuevos: 1110 megavatios (eléctricos) (MW(e)) de Belarusian-1 en Belarús, 1000 MW(e) de Tianwan-5 y 1000 MW(e) de Fuqing-5 en China, 1066 MW(e) de Leningrad 2-2 en la Federación de Rusia y 1345 MW(e) de Barakah-1 en los Emiratos Árabes Unidos. Con la puesta en marcha de Belarusian-1 en Belarús y Barakah-1 en los Emiratos Árabes Unidos, se inauguró la generación de electricidad nuclear en ambos países.

15. En 2020 comenzó a explotarse comercialmente Akademik Lomonosov, el primer reactor modular pequeño (SMR) avanzado y única central nuclear flotante del mundo. Se encuentra en la Federación de Rusia, justo frente a la costa ártica, y aloja dos unidades SMR KLT40S de 35 MW(e).

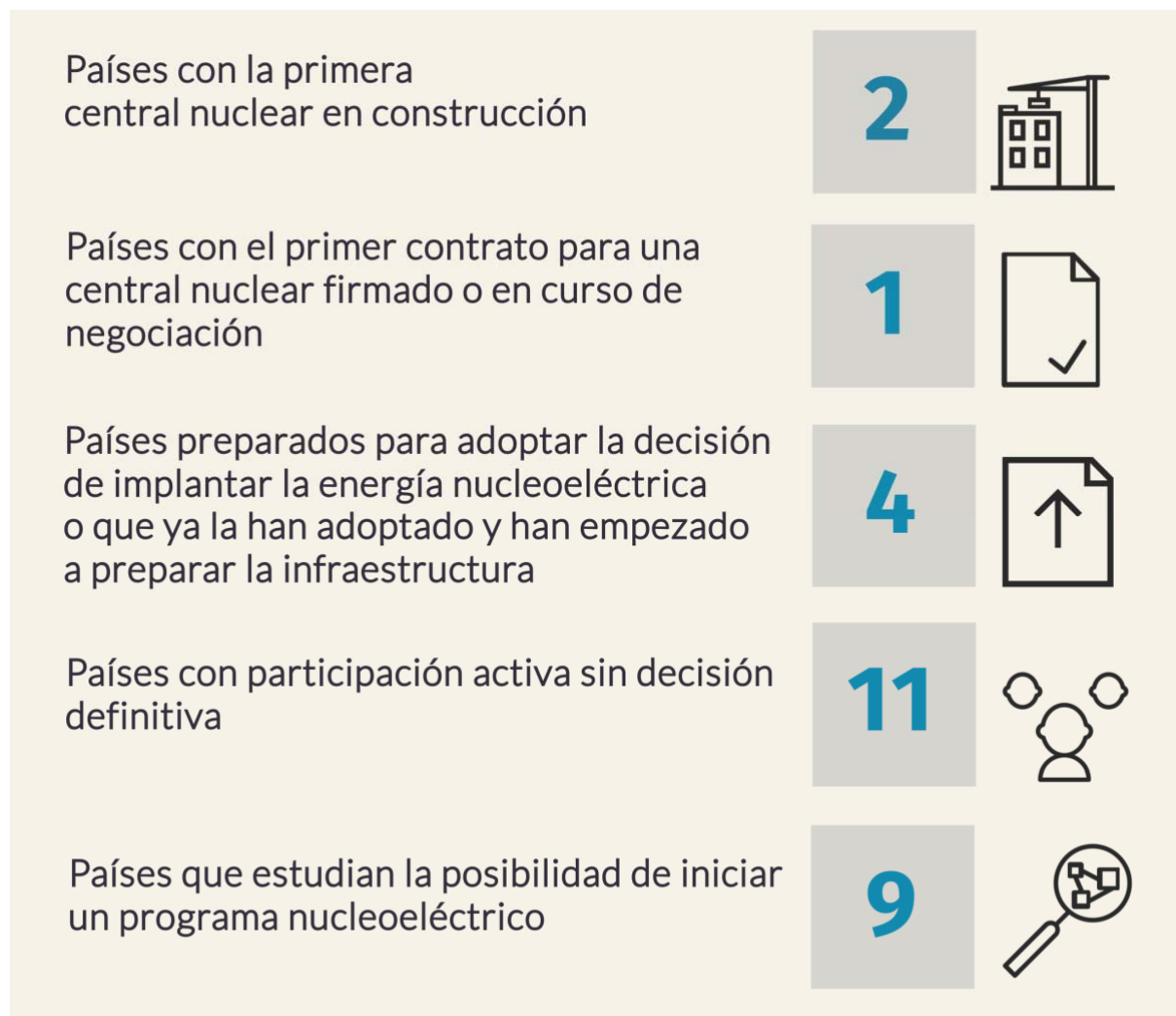
16. En todo el mundo, en torno al 89,5 % de la capacidad nucleoelectrica en funcionamiento correspondía a reactores moderados y refrigerados por agua ligera; el 6 % a reactores moderados y refrigerados por agua pesada; el 2 % a reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito (LWGR) y otro 2 % a reactores refrigerados por gas. El 0,5 % restante provenía de tres reactores rápidos refrigerados por metal líquido con una capacidad total de 1,4 GW(e).

17. En 2020 se retiraron 5,2 GW(e) de capacidad nuclear, con la parada definitiva de seis reactores nucleares de potencia: Fessenheim-1 (un PWR de 880 MW(e)) y Fessenheim-2 (un PWR de 880 MW(e)) en Francia, Leningrad-2 (un LWGR de 925 MW(e)) en la Federación de Rusia, y Duane Arnold-1 (un reactor de agua en ebullición (BWR) de 601 MW(e)) e Indian Point-2 (un PWR de 998 MW(e)) en los Estados Unidos de América. El último día de 2020, Ringhals-1 (un BWR de 881 MW(e)) en Suecia, entró en régimen de parada tras más de 46 años de servicio.

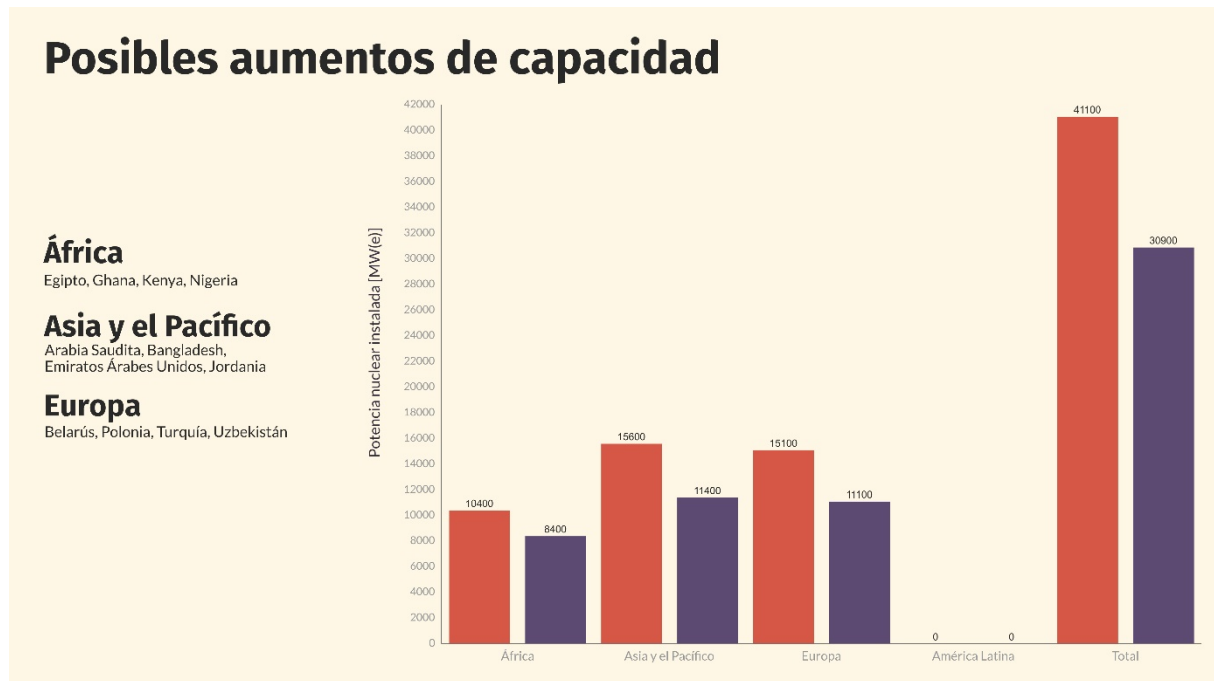
18. En los últimos diez años la capacidad nucleoelectrica ha mostrado, por lo general, una tendencia gradual al alza, incluidos unos 23,7 GW(e) de nueva capacidad procedentes de reactores nuevos o de mejoras de los ya existentes. La generación de energía nucleoelectrica ha demostrado un crecimiento continuo, con una expansión de más del 6 % desde 2011.

19. De los 52 reactores que se están construyendo, 9 se encuentran en países en fase de incorporación al ámbito nuclear. Un total de 28 países han manifestado interés en la energía nucleoelectrica y están considerando la posibilidad de incluirla en su canasta energética, planificando dicha inclusión o trabajando activamente con ese fin. Otros 24 Estados Miembros participan en actividades del Organismo relacionadas con infraestructura nuclear o en proyectos de planificación energética por

conducto del programa de cooperación técnica. Entre 10 y 12 Estados Miembros en fase de incorporación tienen previsto explotar centrales nucleares para 2030-2035, con lo que el número de países que disponen de centrales en funcionamiento podría incrementarse casi un 30 %. Varios países en fase de incorporación han expresado asimismo su interés en la tecnología de los SMR, en particular la Arabia Saudita, Estonia, Ghana, Jordania, Kenya, Polonia y el Sudán, y también países en fase de ampliación, como Sudáfrica. Basándose en su enfoque de los hitos, el OIEA ofrece el servicio de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) a países tanto en fase de incorporación como de ampliación de su programa nucleoelectrico, a fin de ayudar a garantizar que la infraestructura necesaria para un uso sostenible y tecnológica y físicamente seguro de la energía nucleoelectrica se desarrolla y se ejecuta de manera responsable y ordenada.



20. El Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) sigue siendo un servicio muy solicitado, con el que el Organismo brinda apoyo a los Estados Miembros para examinar el estado de su infraestructura nuclear nacional y detectar lagunas de modo sistemático e integrado. Hasta la fecha, se han llevado a cabo 32 misiones INIR en 22 Estados Miembros.




C. Perspectivas de la energía nucleoelectrica

21. La modelización de hipótesis conforme a los objetivos del Acuerdo de París de 2015 suele señalar la energía nucleoelectrica como un aspecto clave para lograr la descarbonización del sector eléctrico, en la medida en que suministra ininterrumpidamente a la red electricidad fiable con bajas emisiones de carbono. Dado el incremento de la demanda de electricidad en todo el mundo para satisfacer las necesidades de la población mundial y garantizar su acceso a la electricidad de aquí a 2050, y dado el mayor nivel de electrificación de la economía, habrá que aumentar notablemente la generación de electricidad con bajas emisiones de carbono. Mientras que esa generación provendrá, en su mayoría, de energías renovables variables, como la eólica y la solar fotovoltaica, la energía nuclear mantendrá su proporción mundial (del 8 % al 10 %) y brindará la flexibilidad y la capacidad de distribución que necesitan los sistemas de electricidad con bajas emisiones de carbono. Según las proyecciones del Organismo para el escenario de alta capacidad de aquí a 2050, se prevé que la potencia nuclear instalada aumente hasta 715 GW(e), apoyándose en la amplia explotación a largo plazo de las centrales existentes, así como en 500 GW(e) de otras nuevas que se construirán a lo largo de tres decenios. Según la proyección baja, se estima que la capacidad mundial de generación de electricidad nuclear se reducirá un 7 % para 2050 hasta llegar a 363 GW(e), cifra que representa el 6 % de la generación mundial de electricidad, frente al 10 %, aproximadamente, en 2019. Sin embargo, incluso en esa estimación a la baja se prevé una importante construcción de nuevas centrales nucleares, al presuponer que más o menos un tercio de los reactores nucleares de potencia existentes se retirarán del servicio de aquí a 2030, mientras que los nuevos reactores sumarán casi 80 GW(e) de capacidad. Entre 2030 y 2050 se prevé que la capacidad dotada por los nuevos reactores será casi igual a la que se pierda con las retiradas de servicio.

Proyección del OIEA para el escenario de alta capacidad

Incremento de la capacidad nuclear instalada hasta

715
GW(e) 

basándose en una amplia explotación a largo plazo de las centrales existentes, así como

500GW(e)

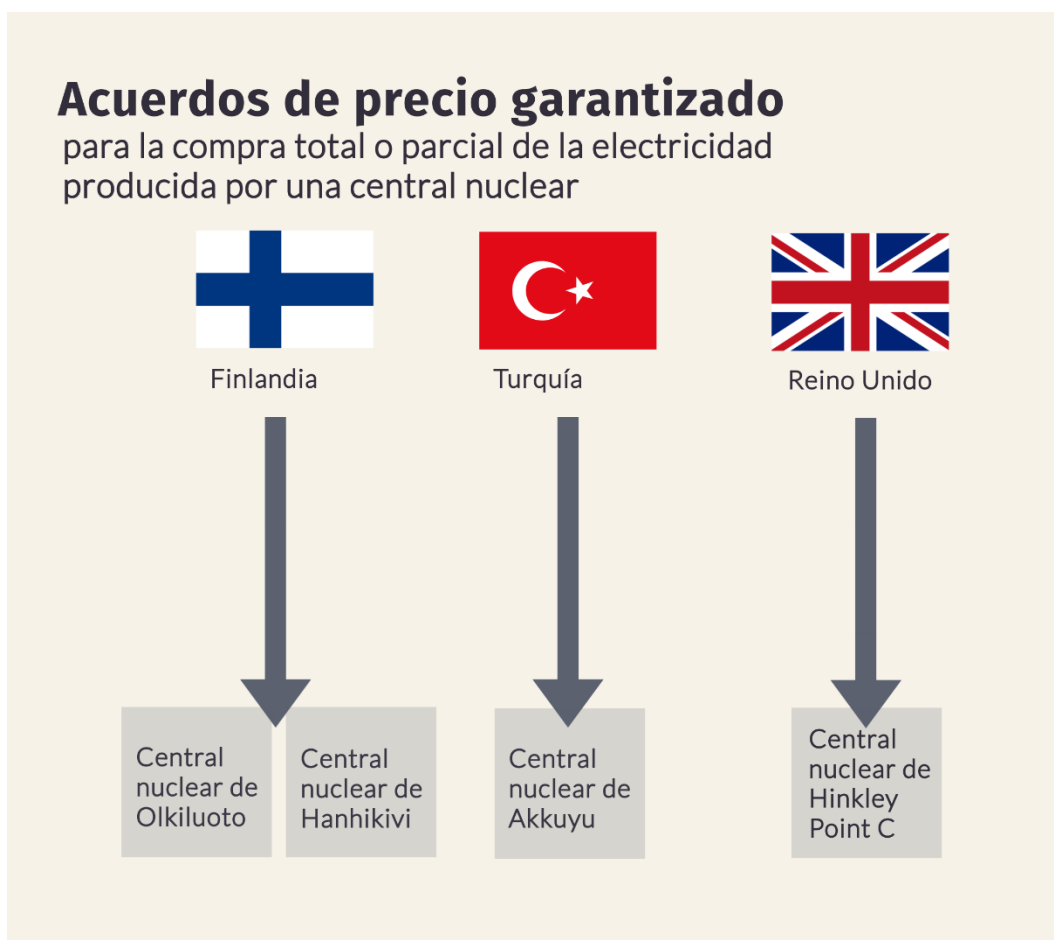
de otras nuevas que se construirán a lo largo de tres decenios.

22. A fin de recuperarse del impacto de la pandemia de COVID-19, los gobiernos de todo el mundo están estudiando medidas de recuperación económica. Estas ofrecen una oportunidad excepcional para armonizar las inversiones públicas con las necesidades de cara a la transición a una energía limpia. Por consiguiente, se está prestando atención a los resultados de las inversiones en las tecnologías verdes. En marzo de 2021, el FMI publicó un documento de trabajo en el que se muestra que las inversiones en tecnologías verdes tienen un impacto mayor en el PIB nacional que las inversiones en activos relacionados con fósiles. Además, el impacto de las inversiones en programas nucleares es mayor (multiplicador más alto del PIB) que el de las inversiones en cualquier otra tecnología verde. El análisis macroeconómico realizado por el Organismo ha mostrado, además, que los proyectos de energía nucleoelectrónica propician la creación de numerosos empleos bien remunerados y tienen otros efectos positivos sobre la economía.

D. Factores que influirán en la futura implantación de la energía nucleoelectrónica

D.1. Fondos y financiación

23. Los costos de capital asociados al desarrollo de una nueva central nuclear son considerables y podrían suponer cerca de las tres cuartas partes del costo normalizado de la electricidad nuclear. Estos pasivos vinculados a intereses se extinguen durante la vida útil de una central, al compensarse con los ingresos generados por la electricidad producida. Ahora bien, los proyectos con gran intensidad de capital son sensibles a las fluctuaciones en el tipo de interés y a la duración de las obras de construcción, así como a la naturaleza de estas incertidumbres. Se han elaborado diversos modelos posibles de financiación para abordar algunas de esas incertidumbres, en particular los riesgos de mercado a los que pueden estar expuestos los promotores de los proyectos —y los proveedores de la financiación— durante la fase de explotación del ciclo de vida de una central. Para mitigar esos riesgos se pueden concertar acuerdos —posiblemente respaldados por el Gobierno del país que albergue la central— que dispongan la compra de una parte o la totalidad de la energía producida por la central a un precio garantizado. Estos acuerdos han sido decisivos en el desarrollo de proyectos como los de las centrales nucleares de Olkiluoto y Hanhikivi en Finlandia, de Akkuyu en Turquía y de Hinkley Point C en el Reino Unido.



24. La mitigación de los riesgos a los que está expuesta una central nuclear en etapas más tempranas de su ciclo de vida —vinculados a retrasos en la construcción y los consiguientes sobrecostos— se puede lograr de diversas maneras, por ejemplo, mediante la oferta por el gobierno anfitrión de garantías soberanas directas a las entidades crediticias o mediante la aceptación por los proveedores de los sistemas nucleares de generación de vapor de una participación en el proyecto. Esto último es lo que ocurrió en el proyecto de central nuclear de Barakah en los Emiratos Árabes Unidos, donde la Corporación de Energía Eléctrica de Corea adquirió una participación del 18 % en Nawah Energy Company y Barakah One Company; en el proyecto de central nuclear de Hanhikivi en Finlandia, donde la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” de la Federación de Rusia adquirió una participación del 34 %, y en el proyecto de Hinkley Point C en el Reino Unido, donde la empresa francesa Électricité de France y el grupo China General Nuclear Power Group poseen dos tercios y un tercio del capital, respectivamente. Por lo que respecta a proyectos recientes de nueva construcción en países en fase de incorporación y de ampliación, como Bangladesh, Belarús, Egipto, Hungría, el Irán y el Pakistán, el país proveedor y el Gobierno anfitrión eligieron concertar acuerdos intergubernamentales con préstamos gubernamentales.

25. Los SMR podrían presentar ventajas frente a los grandes reactores, tales como plazos de construcción más breves, menores costos de capital iniciales, aplicabilidad a redes más pequeñas y posibilidades de expansión modular para satisfacer gradualmente la demanda. Dichas ventajas podrían hacer que se reconsideraran los actuales modelos financieros utilizados para centrales nucleares grandes. Una demostración satisfactoria de los SMR durante los próximos diez años, aproximadamente, podría alentar a más países en fase de ampliación y de incorporación a estudiar la posibilidad de integrarlos. Los inversores privados están demostrando un creciente interés en el desarrollo, la demostración y el despliegue de la tecnología de los SMR.

26. Otro pasivo importante dimana de aquellos costos que surgen al final de la vida operacional de una instalación, como los relacionados con la clausura de la instalación y la gestión a largo plazo de los desechos radiactivos de actividad alta. Al igual que ocurre con los costos “iniciales”, también se ha de destinar parte de los ingresos de explotación para asumir estos costos “finales”, que podrían alcanzar el 10 % del costo normalizado de la electricidad nuclear. En la legislación por la que se rige el uso de la energía nuclear suelen establecerse requisitos para la reserva de fondos, durante la fase de generación de ingresos de la vida operacional de una central, con miras a cubrir los costos finales. Se adoptan numerosos enfoques distintos, que van desde exigir a los propietarios que destinen los ingresos correspondientes dentro de los libros contables de la empresa hasta exigir que se transfieran los fondos pertinentes a una organización independiente encargada de su gestión y ulterior desembolso para cubrir los pasivos finales.

D.2. Mercados de la electricidad y políticas

27. Entre los acontecimientos importantes ocurridos en los mercados mundiales de energía desde 2017 cabe mencionar el continuo despliegue de grandes cantidades de energía renovable con costos cada vez menores (es el caso de la energía eólica y la solar fotovoltaica), el desplazamiento de la demanda de electricidad de los países de la OCDE a los países no miembros de esta organización debido a la creciente electrificación de diversos sectores, el notable incremento en la tarificación del carbono como resultado de las políticas, y cambios en los sistemas de comercio de los derechos de emisión. Además del desarrollo de “taxonomías” o, de manera más general, criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) para inversiones sostenibles, y un mayor compromiso por parte de muchos Estados Miembros con miras a lograr unas emisiones netas cero para mediados de siglo, los activos de carbón han pasado a ser un pasivo, y las instituciones financieras están dejando de invertir en carbón. La generación de energía nucleoelectrica ha seguido aumentando y en 2019 alcanzó el segundo nivel más alto de la historia. En 2020, los confinamientos relacionados con la COVID-19 afectaron a los mercados de energía; durante varios meses la demanda se redujo significativamente y la generación de combustible fósil cayó todavía más en favor de tecnologías de bajo costo marginal, como las energías renovables y la nuclear. Desde entonces, las emisiones han repuntado con la recuperación económica. Además de centrarse en reducir las emisiones de carbono, los encargados de formular políticas han de atender las necesidades de seguridad del suministro, calidad del aire y resiliencia.

28. Si el potencial de la energía nucleoelectrica como fuente de energía baja en carbono empezara a reconocerse más ampliamente, el Acuerdo de París debería redundar en beneficio de su desarrollo. El Informe Especial del IPCC titulado *Calentamiento global de 1,5 °C*, publicado en 2018, y el informe de la AIE titulado *Net Zero By 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, de reciente publicación, muestran que en la mayoría de los caminos hacia unas emisiones netas cero figura la energía nucleoelectrica, con niveles de generación de electricidad nuclear que se duplicarán en los tres próximos decenios. Por ahora, las contribuciones determinadas a nivel nacional en el marco del Acuerdo de París, recientemente actualizadas, no parecen indicar un cambio en el llamado a que la energía nucleoelectrica contribuya a las estrategias nacionales de mitigación del cambio climático. En algunos países, sin embargo, el problema del cambio climático es un incentivo para apoyar la explotación continua de centrales nucleares o parte de la justificación para poner en marcha nuevos programas de construcción. Un claro potencial de la energía nucleoelectrica radica en su capacidad para ayudar a descarbonizar sectores donde cuesta reducir las emisiones, que son de difícil electrificación. El calor o el hidrógeno bajos en carbono producidos por las centrales y reactores avanzados actuales podrían ser fundamentales para la consecución de los objetivos de los países en materia de emisiones netas cero, siempre y cuando la tecnología pase a ser comercialmente viable más o menos en los próximos diez años. Entretanto, sigue siendo primordial incrementar el papel de la energía nuclear en la producción de electricidad con bajas emisiones de carbono y, hasta cierto punto, de calor, mediante la explotación a largo plazo de las centrales existentes y otras centrales nucleares nuevas.

29. Las estimaciones del Organismo para 2050 indican que para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París será necesario, como mínimo, duplicar la capacidad nucleoelectrónica actual de aquí a 2050, de conformidad con las previsiones de la AIE. Las políticas energéticas y los incentivos del mercado de la electricidad que promuevan todo tipo de soluciones con bajas emisiones de carbono, incluida la energía nucleoelectrónica, contribuirán de manera fundamental a incentivar la inversión en la energía nucleoelectrónica y reducirán los riesgos y el costo de la financiación. Esto resulta necesario para garantizar el despliegue oportuno de energía nucleoelectrónica con miras a mitigar el cambio climático. Al mismo tiempo, deben reconocerse las ventajas de la energía nucleoelectrónica en cuanto a la seguridad del suministro, la fiabilidad y la previsibilidad, así como su contribución a la resiliencia de las infraestructuras energéticas al cambio climático. Ello es especialmente urgente en un entorno en que la electricidad depende de un número creciente de tecnologías renovables variables, como la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. Algunas políticas adoptadas recientemente sirven de ejemplo para destacar el papel de los mercados de la electricidad en el desarrollo de la energía nucleoelectrónica: en el Reino Unido, los mecanismos del contrato por diferencias o de base de activos regulados que se estudia aplicar en los nuevos proyectos nucleares a fin de garantizar el rendimiento de la inversión, o los distintos tipos de apoyo implantados en varios estados de los Estados Unidos de América (Nueva York, Illinois, Connecticut, Nueva Jersey y Ohio) para valorar la generación de electricidad nuclear con bajas emisiones de carbono y apoyar las centrales nucleares existentes.

D.3. Resiliencia

30. En febrero de 2021, la tormenta invernal desatada en América del Norte, con cortes eléctricos fruto de una combinación de factores, mostró la importancia de contar con sistemas energéticos fiables. Como consecuencia del calentamiento global, se prevé un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos de creciente intensidad. Estos podrían ir desde tormentas invernales hasta intensas inundaciones u olas de calor y sequías, capaces de afectar los activos de generación y las infraestructuras de la red. Si bien en los últimos decenios el sector nuclear ha notificado² un creciente número de interrupciones del servicio relacionadas con las condiciones meteorológicas, esas interrupciones se han traducido en una pérdida relativamente limitada de generación, debido a que las centrales nucleares están diseñadas para funcionar de manera segura y eficiente en condiciones meteorológicas extremas.

31. Se han implantado medidas de adaptación específicas en varias centrales que podrían verse sumamente expuestas a inundaciones o a una pérdida de eficiencia de refrigeración motivada por olas de calor y sequías. Sin embargo, pese a que se realizan continuas inversiones para garantizar los más altos niveles de seguridad, la aplicación de medidas de adaptación orientadas únicamente a mejorar el rendimiento de una central en caso de que ocurran fenómenos relacionados con el clima dependerá del rendimiento previsto de la inversión. Se trata de una decisión económica que las compañías eléctricas han de tomar estimando el costo de adaptación y el rendimiento previsto en función de la vida útil restante de una central, así como los beneficios derivados de una mejora en el rendimiento o en la generación de dicha central. El precio al que se puede vender la electricidad en los mercados de electricidad desempeña un papel fundamental, y los bajos precios de la electricidad al por mayor que se han observado en los últimos diez años en los mercados de Europa y América del Norte no han propiciado esa clase de inversiones de adaptación. En relación con las nuevas construcciones, para la selección de emplazamientos y el dimensionamiento del equipo se tienen en cuenta, además, los posibles riesgos planteados por los fenómenos climáticos que podrían ocurrir durante este siglo.

² Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del OIEA.

32. Durante los confinamientos relacionados con la COVID-19, las medidas de los Estados Miembros se centraron en garantizar la seguridad y el bienestar del personal mediante una pronta actuación para reducir al mínimo el riesgo de propagación de la pandemia, manteniendo al mismo tiempo la continuidad de las actividades y unos niveles adecuados de seguridad tecnológica, de seguridad física y de sostenibilidad en las centrales nucleares. Ningún Estado Miembro notificó parada forzosa alguna de un reactor nuclear de potencia por las repercusiones de la COVID-19 en su personal o en servicios esenciales como las cadenas de suministro. Por lo general los órganos reguladores han aplicado un enfoque graduado durante la pandemia y han adaptado el alcance de las inspecciones reglamentarias o de otras inspecciones en función de su importancia para la seguridad. El Organismo recibió informes sobre las consecuencias de las interrupciones del servicio en centrales nucleares de 26 de los 32 Estados Miembros con centrales en funcionamiento. En algunos casos se restringió el alcance de la interrupción suprimiendo tareas no indispensables para reducir al mínimo la presencia de personal externo en el emplazamiento. En ciertos casos se alargó la duración de la interrupción del servicio para poder trabajar a un ritmo más pausado y respetar así las restricciones de distanciamiento físico. Y en otros, interrupciones completas quedaron pospuestas hasta el año siguiente. Las repercusiones se harán sentir, al menos, hasta el próximo año, ya que se están revisando los planes de futuras interrupciones para poder efectuar las labores pospuestas.

D.4. Reactores avanzados y aplicaciones no eléctricas

33. Se han producido avances tangibles en el desarrollo de la tecnología de los SMR de las líneas tecnológicas, los rangos de potencia, las categorías de utilización y los tipos de despliegue más importantes. Entre los principales impulsores de la tecnología de los SMR se incluyen una menor inversión de capital, plazos de construcción más breves, la flexibilidad en la selección de un emplazamiento y la aplicabilidad a una amplia gama de usos, entre ellos la sustitución de centrales eléctricas a base de combustibles fósiles fuera de servicio y su capacidad para funcionar en un sistema energético integrado con energías renovables y aplicaciones no eléctricas como la producción de calor e hidrógeno con bajas emisiones de carbono.

34. El primer SMR se instaló en una unidad flotante de potencia marina de la Federación de Rusia y se está explotando comercialmente desde mayo de 2020 con una capacidad nucleoeléctrica de 70 MW(e). En relación con los SMR situados en tierra, actualmente se están terminando los ensayos funcionales activos con el primer reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas (MHTGR), con el objetivo de conectarlo a la red eléctrica hacia finales de 2021 en China. Otro ejemplo es el SMR de tipo PWR integrado que se encuentra en una fase avanzada de construcción (75 %) en Argentina, cuya puesta en marcha y criticidad están previstas para 2024, con una capacidad estimada de 30 MW(e).

35. Se espera alcanzar la competitividad tecnológica de los SMR mediante un nivel elevado de construcción modular que reduzca los costos y los plazos de construcción, así como la sustitución de la “economía de escala” por la “economía de producción en serie” en los grandes reactores. Actualmente hay 72 diseños de SMR con diverso grado de disponibilidad tecnológica³, de los cuales 25 tienen prevista una fecha de demostración de aquí a 2030. Si se facilitara el entorno global para el despliegue, incluido el ciclo del combustible, los SMR aportarían posiblemente alrededor de 1,6 GW(e) adicionales. Sin embargo, la tecnología de los SMR debe superar aún problemas relativos al despliegue y lograr competitividad comercial, para lo cual deben cumplirse varias condiciones: la demostración de la seguridad y el comportamiento operacional de primeros reactores de este tipo de diseños y tecnologías nuevos; la continuidad de pedidos, la competitividad de costes frente a las opciones alternativas, la solidez de la cadena de suministro, la disponibilidad a escala del ciclo del combustible y la viabilidad

³ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*, IAEA, Vienna (2020).

de los planes de financiación, y los marcos reguladores (vías de concesión de licencias) deben establecerse mediante su armonización. Debería crearse infraestructura nuclear adecuada para la gobernanza responsable de este despliegue en serie más amplio previsto en nuevos mercados.

Actualmente hay

72 diseños de SMR con diverso grado de disponibilidad tecnológica,

de los cuales

25 diseños de SMR tienen una fecha de despliegue prevista de aquí a 2030.

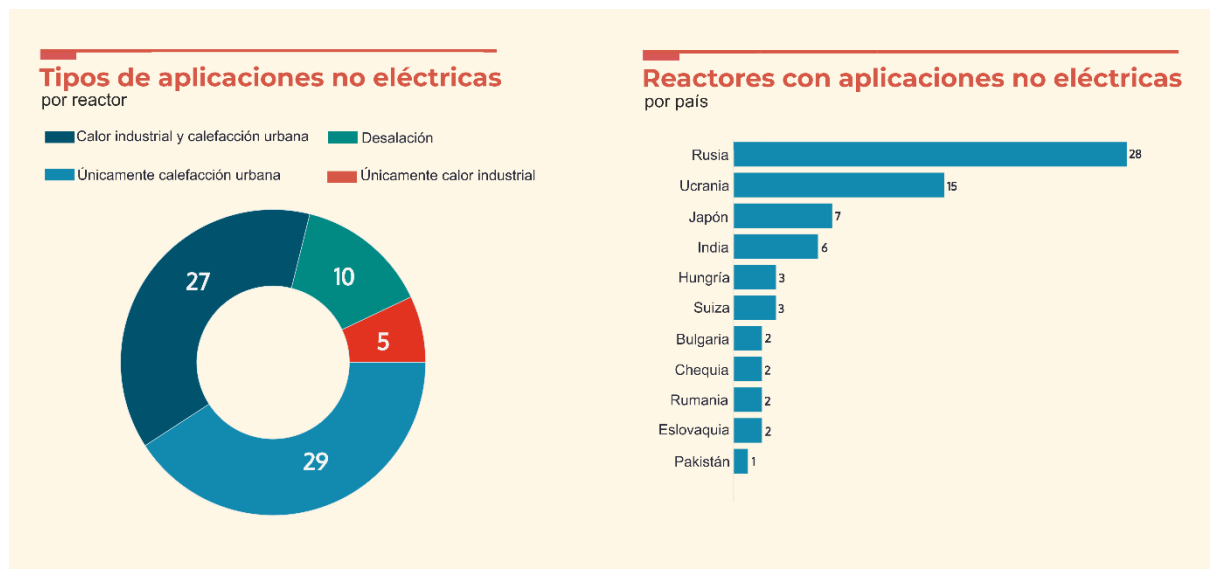
36. Los microrreactores son otra tecnología emergente, con un rango de potencia de entre 1 MW(e) y 20 MW(e), capaz de suministrar electricidad a regiones industriales remotas o no conectadas a la red, proporcionar resistencia energética, servir como alternativa al diésel y desplegarse en mercados donde ni siquiera los SMR “normales” serían apropiados.

37. Cinco reactores rápidos se encuentran ya en funcionamiento: dos reactores en funcionamiento (el BN-600 y el BN-800) y un reactor de ensayo (el BOR-60) en Rusia, el Reactor Reprodutor Rápido de Ensayo de la India y el Reactor Experimental Rápido de China. En la Federación de Rusia se empezó a construir el reactor rápido BREST-OD-300 en junio de 2021, que será el primer reactor de energía nuclear para usos civiles refrigerado por plomo. Como este metal no reacciona al contacto con el aire y el agua, el diseño del reactor puede ser aerodinámico, lo que lo hace más económico en comparación con otros reactores rápidos. El reactor de 300 MW forma parte del proyecto Proryv, cuyo objetivo es demostrar el funcionamiento estable, en un emplazamiento, de las instalaciones necesarias para un ciclo totalmente cerrado del combustible nuclear. De conseguirlo, constituirá un paso importante para el futuro desarrollo de la energía nuclear y proporcionará al mismo tiempo una mayor sostenibilidad mediante el reciclaje del combustible y una reducción de la huella de los desechos. Otros países también están avanzando en este ámbito. China, por ejemplo, está construyendo dos grandes unidades de reactores rápidos de demostración y tiene previsto desplegar más adelante reactores rápidos comerciales. La India está terminando de poner en servicio su prototipo de reactor reproductor rápido refrigerado por sodio, el primero de una serie de reactores rápidos industriales que el país tiene previsto instalar. TerraPower ha anunciado que construirá su primer reactor nuclear de la próxima generación, llamado Natrium, en el emplazamiento de una de las centrales de carbón de Wyoming que se han retirado del servicio. El Japón está realizando estudios de viabilidad en el marco de su Programa de Energía Nuclear X Promoción de la Innovación (NEXIP), como primera fase de su hoja de ruta estratégica de reactores rápidos para el desarrollo de este tipo de reactores.

38. Tras el accidente de Fukushima, continúan las innovaciones en la tecnología de los reactores refrigerados por agua (WCR) en las esferas de la seguridad, la tecnología de la construcción y la economía. Los sistemas de seguridad diseñados en los WCR avanzados actuales incorporan características pasivas que no necesitan alimentación eléctrica e incluyen inventarios de agua más grandes, de modo que, en caso de condiciones imprevistas, como apagones prolongados de la central, se podría hacer frente a la situación durante días en lugar de horas. Otras ventajas de los WCR avanzados son la menor producción de desechos, la mayor utilización del combustible, el aumento de la fiabilidad, la resistencia a la proliferación y su capacidad de integración en aplicaciones eléctricas y no eléctricas. Al mejorar el rendimiento térmico y la economía, como una ampliación lógica de los diseños de PWR y

BWR avanzados, los conceptos de WCR supercríticos que se están desarrollando en una serie de Estados Miembros señalan estas características favorables del diseño en relación con la economía, la seguridad y la tecnología.

39. La necesidad de descarbonización del sector de la calefacción y del sector eléctrico ha hecho despertar un mayor interés en el uso de la energía nuclear, no solo para la generación de electricidad, sino también para otras aplicaciones no eléctricas de alto consumo de energía como la desalación de agua de mar, la calefacción urbana, el calor industrial y la síntesis de combustible (incluida la producción de hidrógeno). Existe un gran potencial de aprovechamiento del calor nuclear procedente de los reactores convencionales, ya que entre el 60 % y el 70 % de este se desecha en el medio ambiente en forma de calor residual y se pierde. Este calor residual puede reutilizarse en modalidad de cogeneración, es decir, la producción simultánea de electricidad y calor o un producto derivado del calor. Por ejemplo, a finales de 2020 la central nuclear de Haiyang, en la provincia de Shandong (China), comenzó a suministrar calefacción urbana en la zona circundante, con lo que se prevé evitar el uso de 23 200 toneladas de carbón por año y, de esta manera, reducir las emisiones de CO₂ en 60 000 toneladas.



40. La producción de hidrógeno a partir de la energía nuclear está suscitando cada vez más interés en muchos países, entre ellos China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, Polonia, y el Reino Unido. La implementación efectiva de la producción nuclear de hidrógeno dependerá de las condiciones del mercado reflejadas en los precios, los competidores, la demanda total y la distribución geográfica del consumo. En el contexto de medidas en materia de política climática, se presentará una gran oportunidad para el hidrógeno nuclear si se logra despertar un rechazo general (mediante el pago de impuestos) al reformado de metano con vapor.

41. La energía nuclear y las energías renovables son las dos opciones principales para la generación de energía con bajas emisiones en carbono. Los sistemas híbridos de energía nuclear-renovable aprovechan los beneficios de cada tecnología y su modalidad de funcionamiento para suministrar electricidad fiable, sostenible y asequible a la red y energía con bajas emisiones de carbono a otros sectores. En esta integración de la energía nuclear y los recursos renovables, la calefacción, la electricidad y otros productos o servicios energéticos podrían producirse y, según procediera, almacenarse. Además de electricidad, los sistemas híbridos de energía nuclear-renovable pueden suministrar energía a diversas aplicaciones, como la producción de hidrógeno e hidrocarburo, la calefacción o la refrigeración urbana, la extracción de recursos petrolíferos terciarios, la desalación de agua de mar o de agua salobre, y las aplicaciones de calor industrial, entre ellas la cogeneración, la producción y la refinación de combustibles líquidos a partir del carbón y la síntesis de materias primas químicas. Sin embargo, para lograr un sistema híbrido de energía nuclear-renovable plenamente

operativo y perfectamente acoplado es necesario atender y subsanar varias deficiencias existentes, entre ellas el logro de un nivel necesario de seguridad en el sistema híbrido de energía nuclear-renovable que por lo menos sea equiparable al de las actuales centrales nucleares autónomas; el desarrollo del capital humano para operar y mantener estos sistemas; la interacción del sistema híbrido de energía nuclear-renovable con la reglamentación del mercado de electricidad y la red eléctrica, y el grado de preparación tecnológica de un sistema híbrido de energía nuclear-renovable, el cual depende en gran medida del grado de preparación tecnológica de cada subsistema y de los mecanismos de acoplamiento y operación.

42. En los últimos años, la tecnología de fusión ha realizado avances importantes, lo cual ha dado lugar a un compromiso más firme del sector privado y a nuevas oportunidades laborales. El ITER avanza a un ritmo constante y es un paso esencial hacia el objetivo de aprovechar la energía de fusión. En los próximos cinco años se llevarán a cabo avances significativos, que continuarán hasta 2035, año en que se espera que el ITER alcance su objetivo final: demostrar la viabilidad de la energía de fusión. A excepción de la física del plasma, los principales desafíos que enfrentan los reactores de fusión se encuentran en la esfera del desarrollo de materiales para las estructuras de la fuente de calor (material resistente al plasma) y en la del diseño de sistemas de refrigeración para altas eficiencias. Tal vez la fusión no sea la fuente de energía del mañana, pero podría ser una solución para el final del siglo. La transferencia de 70 años de experiencia en los usos pacíficos de la energía de fisión a la futura tecnología de fusión permitiría crear una sinergia entre dos fuentes de energía nucleares que podrían suministrar energía sostenible a las generaciones que están por venir.

D.5. Sostenibilidad del combustible y ciclos del combustible innovadores

43. Se prevé que, de aquí a 2040, las necesidades mundiales de uranio al año serán del orden de 56 640 a 100 225 toneladas de uranio (t U), en función del número de centrales nucleares de nueva construcción y las prolongaciones de la vida útil de las ya existentes. Por consiguiente, en la hipótesis baja del Organismo, la actual demanda mundial de uranio debe mantener los mismos valores de 2019. En cambio, en la hipótesis alta del Organismo, la producción anual de uranio tiene que incrementarse en unas 41 000 t U. Para ello harían falta importantes actividades de exploración, innovaciones y la creación de nuevas minas de uranio.

De aquí a 2040, **se prevén unas necesidades mundiales de uranio al año** del orden de

56 640 a 100 225 t U

en función del número de centrales nucleares de nueva construcción y las prolongaciones de la vida útil de las ya existentes.

44. Desde 2019, la producción primaria de las minas de uranio en funcionamiento ha promediado el 87 % de la demanda mundial. El déficit lo han cubierto las fuentes secundarias de suministro, que llevan agotándose paulatinamente desde 2010. Se prevé que los recursos de muchas minas de uranio importantes se acabarán a mediados de la década de 2030. Las actividades de servicio y mantenimiento, el aumento de la producción en las instalaciones existentes y la ejecución definitiva de proyectos avanzados pueden no ser suficientes para cubrir la insuficiencia de suministro. Teniendo en cuenta que el tiempo promedio necesario para construir y poner en servicio una mina nueva es de entre 15 y 20 años, existe preocupación en el sector por la seguridad física del suministro a medio y largo plazo. Los eventos excepcionales, como la pandemia de COVID-19, podrían imponer una carga adicional para

el suministro: en 2020, por ejemplo, varios productores de uranio importantes suspendieron las operaciones o redujeron la producción de manera significativa. En consecuencia, la fuente primaria de suministro de uranio procedente de las minas en funcionamiento se redujo a una producción mundial de alrededor de 46 500 t U. Esta cantidad representa aproximadamente el 78 % de la demanda mundial de uranio, lo que incrementa la presión en las fuentes secundarias de suministro de uranio para cubrir la demanda de ese metal como combustible nuclear.

45. La mejora continua de la tecnología, incluidos los materiales avanzados y los combustibles nucleares, sigue siendo esencial para el éxito del sector nuclear. Los principales impulsores en la esfera de la ingeniería del combustible nuclear son el aumento de los márgenes de la seguridad operacional del combustible, la disminución de los costos de explotación y mantenimiento de las centrales nucleares y la reducción al mínimo de la generación de desechos nucleares mediante el desarrollo de nuevos tipos de combustible para las generaciones actuales y nuevas de centrales nucleares, así como a través del reciclado de materiales nucleares.

46. Los combustibles de tecnología avanzada se están desarrollando como tecnologías alternativas de sistemas de combustible con el objetivo de mejorar aún más la seguridad, la competitividad y la economía de centrales nucleares comerciales para los diseños de reactores actuales y futuros. Al estar compuestos de nuevos materiales, tanto para el combustible como para la vaina, los combustibles de tecnología avanzada desarrollados en Europa, la Federación de Rusia y los Estados Unidos de América a veces requieren niveles de enriquecimiento del uranio 235 (^{235}U) más elevados para compensar la pérdida de transparencia neutrónica del material del plaqueado. Por ello, se están produciendo, desarrollando y poniendo a prueba combustibles de uranio poco enriquecido de alta concentración, enriquecidos por encima del 5 % (pero por debajo del 20 %). A fin de aumentar los beneficios económicos, se está trabajando también para incrementar los quemados de la descarga y prolongar la explotación de los ciclos del combustible en las centrales nucleares, para lo que también es necesario un mayor enriquecimiento del uranio 235. Sin embargo, los conceptos de combustible no irradiado con mayores grados de quemado tendrán un impacto en aspectos de la parte final del ciclo del combustible, como los procesos de transporte del combustible y de gestión del combustible gastado (desde el almacenamiento hasta la disposición final, pasando por el reprocesamiento). Se necesitan inversiones importantes para construir primeras instalaciones de este tipo y concederles licencias a fin de desplegar combustibles avanzados.

47. Como los SMR son de diversos tipos (por ejemplo, reactores de agua ligera (LWR), HTGR, reactores rápidos y reactores de sales fundidas), los combustibles tradicionales y nuevos se están desarrollando, por ejemplo, con diseños, configuraciones y niveles de enriquecimiento diferentes. Para algunos tipos de SMR, el diseño y la fabricación del combustible se basa en tecnologías conocidas, aunque los combustibles puedan precisar niveles de enriquecimiento que se encuentran al límite de lo que se entiende por uranio poco enriquecido (combustibles de uranio poco enriquecido de alta concentración con uranio 235 enriquecido por encima del 5 %, pero por debajo del 20 %).

48. El cierre del ciclo del combustible nuclear es un factor esencial para garantizar la sostenibilidad de la energía nucleoelectrónica. Se puede recuperar el material fisible del combustible nuclear gastado para producir combustible no irradiado. El reprocesamiento de combustibles de óxido de uranio y el reciclaje de uranio y plutonio son prácticas industriales que se aplican hoy en los LWR pese a que en la actualidad haya pocos reactores de ese tipo con licencia para utilizar combustibles reciclados. Se han realizado avances en el reciclado múltiple de plutonio en los combustibles REMIX, CORAIL y MIX. Estos combustibles reciclados facilitarán la transición a las estrategias de reciclado múltiple de plutonio en los reactores rápidos, lo que permitirá un uso más eficaz de los recursos naturales y reducirá la carga de los desechos generados. Se necesitarán inversiones importantes para apoyar la aplicación industrial de estas tecnologías de reciclado múltiple.

D.6. Disposición final de los desechos radiactivos

49. La capacidad de ofrecer soluciones para todas las etapas de la gestión de desechos radiactivos, incluidas las soluciones conexas para la disposición final, es la piedra angular y un elemento fundamental del uso sostenible constante de las tecnologías nucleares. Sobre la base de decenios de experiencia y avances en todo el mundo, los programas nacionales están utilizando tecnologías probadas y demostradas con el objetivo de poner en práctica soluciones eficaces, tecnológica y físicamente seguras y —en caso de tratarse de material nuclear— resistentes a la proliferación en todas las etapas de la gestión de desechos radiactivos. Todas estas etapas preceden a la disposición final de los desechos radiactivos y culminan en ella, para lo cual se han creado numerosas instalaciones que están en funcionamiento en todo el mundo destinadas a desechos de actividad muy baja, baja e intermedia.

50. Se ha creado un acervo internacional de conocimientos muy sólido por medio de múltiples programas de disposición final geológica profunda para desechos de actividad alta, entre los que se incluye el combustible gastado si se declara como desecho. Algunos de los principales programas de repositorios geológicos profundos del mundo son ejemplos de que en el decenio anterior se lograron avances considerables en varios programas nacionales encaminados a la disposición final de desechos de actividad alta, un hito al que el Director General del OIEA, Sr. Grossi, se refirió como un “antes y un después” en relación con el contexto específico de Finlandia. Los programas nacionales más avanzados están a punto de formular la recomendación oficial sobre el emplazamiento para la disposición final (el Canadá y Suiza), de elaborar enfoques para la construcción y la explotación industrial de su instalación de disposición final geológica profunda (Francia y Suecia) o de preparar la solicitud de licencia para la colocación del combustible gastado en una instalación en construcción (Finlandia). Un amplio número de esos programas nacionales se basan actualmente en un marco cooperativo de investigación, desarrollo y demostración —la Plataforma Tecnológica para el Almacenamiento Definitivo Geológico— para progresar aún más en la industrialización y optimización del proceso de disposición final geológica profunda para desechos de actividad alta.

Estado de los programas de disposición final geológica

prepara una solicitud de licencia para la colocación del combustible gastado en una instalación en construcción



Finlandia

preparan enfoques para la construcción y la explotación industrial de una instalación geológica profunda



Francia



Suecia

cuentan con programas nacionales avanzados próximos a formular una recomendación oficial sobre un emplazamiento para la disposición final



Canadá



Suiza

51. A fin de seguir facilitando una gestión oportuna y eficaz de la futura producción de desechos radiactivos, los Estados Miembros están mejorando el cálculo de la totalidad de sus flujos de desechos nacionales provenientes de todas las aplicaciones de la tecnología nuclear y estableciendo enfoques integrados para las responsabilidades nacionales en materia de gestión de desechos

radiactivos. El enfoque integrado es muy prometedor de cara a la reducción de costos relacionados con las responsabilidades en materia de gestión de desechos radiactivos; se ajusta plenamente en todas sus fases a un enfoque del “valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse”, al tiempo que optimiza el uso de los recursos y ofrece mayor claridad respecto de la planificación a corto y largo plazo. La experiencia de los Estados Miembros demuestra que es viable desarrollar y poner en práctica soluciones para la gestión de desechos y sus lugares de destino asociados a la disposición final. Sin embargo, en muchos casos persisten desafíos derivados de prácticas nacionales anteriores y legados históricos. Los inventarios incompletos y la caracterización deficiente de los desechos dificultan el procesamiento ulterior eficaz y limitan las opciones de disposición final adecuada. Las estimaciones inadecuadas de recursos en el pasado han entorpecido el desarrollo necesario de capacidades e instalaciones, mientras que las prácticas de disposición final en el pasado han reforzado la idea general de que la gestión de desechos radiactivos “no es posible”. Esto ha dado lugar a impresiones negativas sobre la disposición final de desechos, lo que ha generado la reticencia de los encargados de tomar decisiones a asumir esta responsabilidad y a proporcionar un marco nacional claro para la aplicación adecuada de soluciones.

D.7. Clausura

52. Mientras que en decenios anteriores el desmantelamiento diferido era la estrategia de clausura preponderante adoptada por los propietarios de instalaciones, el enfoque de desmantelamiento inmediato ha ido ganando adeptos. Además, los plazos para comenzar el desmantelamiento final de las centrales fuera de servicio se están adelantando cada vez más, y en una serie de estrategias se ha cambiado el desmantelamiento diferido por el inmediato. Este cambio obedece al deseo de reducir las incertidumbres que suscitan los costos de clausura.

53. Dado que la clausura conlleva la conversión de las instalaciones inactivas en un estado de seguridad pasivo, la capacidad de seguir ejecutando el proyecto depende en gran medida de la disponibilidad de recursos financieros suficientes y un sistema apropiado para la gestión a largo plazo del combustible gastado y los desechos radiactivos. Aunque aún no hay ninguna instalación de disposición final definitiva del combustible gastado en funcionamiento, este combustible puede almacenarse de manera segura en piscinas de almacenamiento o instalaciones de almacenamiento en seco, por lo que varias centrales en régimen de parada permanente han construido instalaciones de almacenamiento en seco adyacentes al emplazamiento de la instalación nuclear a fin de avanzar en las actividades de desmantelamiento y demolición.

54. Una gran parte del material en desuso proveniente de la clausura presenta niveles insignificantes de radiactividad, por lo que en muchos casos podría ser liberado del control reglamentario (en función del régimen jurídico nacional) y reutilizado con otros fines. Un enfoque de este tipo funciona bien en muchos países, pero no en todos. En este último caso se incluyen situaciones en que la falta de aceptación pública para reutilizar el material procedente de las centrales nucleares, independientemente de su nivel de radiactividad, puede impedir que ese material se reutilice o se recicle. Dado que no existe un riesgo importante asociado a esas actividades, se considera que estas situaciones no son óptimas desde un punto de vista científico y técnico.

D.8. Desarrollo de recursos humanos: la próxima generación

55. La contratación y retención de profesionales cualificados para contar con personal competente en todas las fases del ciclo de vida de las instalaciones nucleares es una de las prioridades principales que se ha fijado la comunidad nuclear. Sin embargo, las perspectivas laborales a largo plazo en todas las fases del ciclo de vida de las centrales y las organizaciones nucleares hace que el trabajo en la industria nuclear sea un opción atractiva. Además, las carreras profesionales en el ámbito nuclear ofrecen también muchas oportunidades para desempeñar labores importantes para la sociedad, como el suministro de energía limpia y agua o la ayuda a países para que logren su desarrollo socioeconómico.

56. Las preocupaciones por la posible escasez de personal cualificado plantean distintos desafíos para diferentes países. Un problema particular de los proyectos nucleares de nueva construcción es la detección y el desarrollo de conocimientos especializados y de capital humano, debido a que esos proyectos son escasos y, salvo en China, la Federación de Rusia, el Japón y la República de Corea, se suelen ejecutar con muchos años de diferencia. Para que las nuevas generaciones de profesionales nucleares de los países con centrales nucleares en funcionamiento y de los que están en fase de incorporación puedan acceder más fácilmente a actividades de capacitación, enseñanza y creación de capacidad en el ámbito nuclear, se están poniendo en práctica métodos innovadores, como el aprendizaje digital y el aprendizaje mixto. El reto al que se enfrentan los países con programas nucleoeléctricos en expansión es ampliar sus actividades de enseñanza y capacitación existentes para así contar con el personal cualificado necesario en cuanto se requiera.

57. Los países que tienen previsto facilitar tecnología de la energía nuclear pueden ayudar a los países beneficiarios a satisfacer sus necesidades nacionales en materia de recursos humanos transfiriendo capacidades que permitan crear infraestructura de enseñanza y capacitación. Ya se han comprobado los beneficios que aporta la cooperación entre los países con centrales nucleares en funcionamiento y los países en fase de incorporación para reducir las diferencias relativas a la experiencia.

58. En el panorama mundial cambiante, la innovación tecnológica, el incremento de la movilidad y la evolución demográfica siguen dificultando la atracción y retención de talento en el ámbito nuclear. Al mismo tiempo, para que las nuevas generaciones de profesionales nucleares de los países con centrales nucleares en funcionamiento y de los que están en fase de incorporación puedan acceder más fácilmente a actividades de capacitación, enseñanza y creación de capacidad en el ámbito nuclear, se están poniendo en práctica métodos tecnológicos innovadores, como el aprendizaje digital y el aprendizaje mixto.

D.9. Concesión de licencias/marcos reguladores/enfoques

59. La creación de un entorno propicio para la implantación o ampliación tecnológica y físicamente segura y sostenible de la energía nucleoeléctrica se apoya en la función que cumplen los gobiernos en el establecimiento de políticas, programas y marcos jurídicos apropiados para los programas nucleoeléctricos. Todas las fuentes de energía bajas en carbono requieren políticas específicas que apoyen su despliegue. Las políticas deben reflejarse en los sistemas jurídicos, institucionales y de reglamentación nacionales con el objetivo de asegurar un entorno estable y previsible y maximizar su incidencia.

60. Actualmente, el despliegue de energía nuclear a nivel mundial se rige por un régimen jurídico internacional consolidado. Dado que la energía nuclear desempeña un papel importante en la mitigación del cambio climático, cuestiones como una mayor armonización normativa o los modelos operativos de nuevo despliegue podrían tenerse en cuenta en las innovaciones a fin de lograr un futuro más limpio y sostenible.

61. La concesión de licencias para una central nuclear exige una evaluación minuciosa de sus características de diseño y técnicas en lo que respecta a la seguridad tecnológica, a la seguridad física y a las salvaguardias. Los países utilizan las normas de seguridad y la orientación sobre seguridad física del Organismo para sustentar la elaboración de sus marcos reguladores nacionales. El fomento de una cooperación internacional más amplia se considera primordial para la transferencia de conocimientos, la adquisición de competencias en materia de desarrollo y aplicación de marcos reguladores nacionales, y el despliegue más acelerado.

62. El desarrollo oportuno de una infraestructura nuclear propicia y el marco jurídico y regulador conexo en la esfera nuclear que se aplica actualmente a los reactores nucleares de grandes dimensiones en los países en fase de incorporación son factores decisivos para la preparación acelerada del mercado con miras a anticipar el despliegue de los SMR.

63. Las guías y procesos de reglamentación existentes para evaluar tecnologías avanzadas como los SMR están retrasados y en algunos casos aún no están disponibles. En el futuro, sería beneficioso contar con metodologías de examen de la situación reglamentaria sólidas y tecnológicamente neutras a fin de reducir al mínimo el tiempo necesario para adoptar y comercializar nuevas tecnologías de reactores nucleares. En todo caso, los reguladores y los promotores de estas tecnologías tendrán que cooperar para facilitar el reconocimiento de la certificación del diseño y la demostración de estos primeros reactores de este tipo con miras a que el camino hacia la construcción y la explotación sea seguro y sencillo, al tiempo que se orientan los costos para lograr un despliegue competitivo. Actualmente, el Organismo acoge el Foro de Reguladores de SMR y está examinando la aplicabilidad de las normas de seguridad con un enfoque tecnológicamente neutro cuando se consideran los SMR.

D.10. Percepción pública

64. La energía nuclear puede ayudar a abordar cuestiones mundiales acuciantes. Sin embargo, las ideas erróneas sobre la energía nucleoelectrica siguen afectando a la aceptación pública y la formulación de políticas. La percepción pública de los beneficios y los riesgos asociados a la energía nuclear y, en particular, las preocupaciones por los riesgos de la radiación, la gestión de los desechos radiactivos, la seguridad y la proliferación siguen siendo los aspectos que más influyen en la aceptación pública. Como la opinión pública desempeña un papel fundamental en la manera en que los gobiernos eligen producir energía, para tomar decisiones y lograr el éxito de los programas nucleoelectricos es fundamental comprender las opiniones, las percepciones y los conocimientos de las partes interesadas, en relación con la energía nucleoelectrica. El establecimiento de relaciones sólidas, positivas y a largo plazo con las partes interesadas es un factor clave para los programas nucleoelectricos existentes, nuevos y futuros.

65. La experiencia demuestra que la participación de las partes interesadas en los procesos de toma de decisiones, incluso los grupos de partes interesadas que no intervienen de manera directa en esos procesos, puede aumentar la confianza pública en la aplicación de la ciencia y la tecnología nucleares. Esto comprende el diálogo abierto y transparente que fomenta la confianza mutua entre diversas partes interesadas, desde la industria nuclear y las instituciones gubernamentales hasta los medios de comunicación, las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales. Esta interacción ayuda a sensibilizar y promover el entendimiento en relación con todos los aspectos del ciclo del combustible nuclear, desde la extracción de uranio hasta la gestión del combustible gastado y de los desechos radiactivos, pero también ofrece una oportunidad a las partes interesadas para manifestar sus preocupaciones e influir en decisiones que están afectando a sus comunidades.

66. Los medios abiertos y accesibles de participación de los interesados en los programas nucleares existentes han evolucionado, y estas estrategias también se han convertido en la norma en muchas esferas de la selección de un emplazamiento para instalaciones de gestión de los desechos radiactivos y de su establecimiento. Los nuevos programas nucleoelectricos están siguiendo esta tendencia. En efecto, la participación de los interesados es una de las 19 cuestiones de infraestructura del enfoque de los hitos del Organismo, un proceso sólido en tres etapas para desarrollar la infraestructura necesaria para un programa nucleoelectrico.

67. La participación temprana, significativa y frecuente de los interesados contribuirá también al desarrollo y despliegue de nuevas tecnologías, como los SMR, mientras los países examinan su viabilidad como opción para la electricidad con bajas emisiones de carbono y las aplicaciones no eléctricas. La experiencia de los países con centrales nucleares en funcionamiento y de los que están en fase de incorporación, así como las enseñanzas extraídas del despliegue de las tecnologías existentes, pueden contribuir al éxito de las nuevas tecnologías nucleares.

68. Por último, una mejor comprensión por las diversas partes interesadas de la importante función de la energía nucleoelectrica para dotar de estabilidad a las redes eléctricas, especialmente a las que tienen grandes proporciones de fuentes variables de energía renovable, podría redundar en un aumento de la aceptación pública de la energía nucleoelectrica. Esa combinación entre la energía nucleoelectrica y las energías renovables en los sistemas híbridos de energía nuclear-renovable puede ayudar de manera significativa a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y suministrar, al mismo tiempo, electricidad fiable para lograr el desarrollo socioeconómico, respondiendo así a las preocupaciones de muchas partes interesadas. Un mayor reconocimiento por las partes interesadas de que la energía nuclear puede utilizarse para desalinizar el agua del mar, producir hidrógeno con bajas emisiones de carbono y generar calor para edificios y aplicaciones industriales puede mejorar aún más el apoyo del público a esta fuente de energía con bajas emisiones de carbono, ampliando sus posibilidades de contribuir a la acción por el clima y el desarrollo sostenible.



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Átomos para la paz y el desarrollo

www.iaea.org

Organismo Internacional de Energía Atómica

PO Box 100, Vienna International Centre

1400 Viena, Austria

Teléfono: (+43 1) 2600 0

Fax: (+43 1) 2600 7

Correo electrónico: Official.Mail@iaea.org