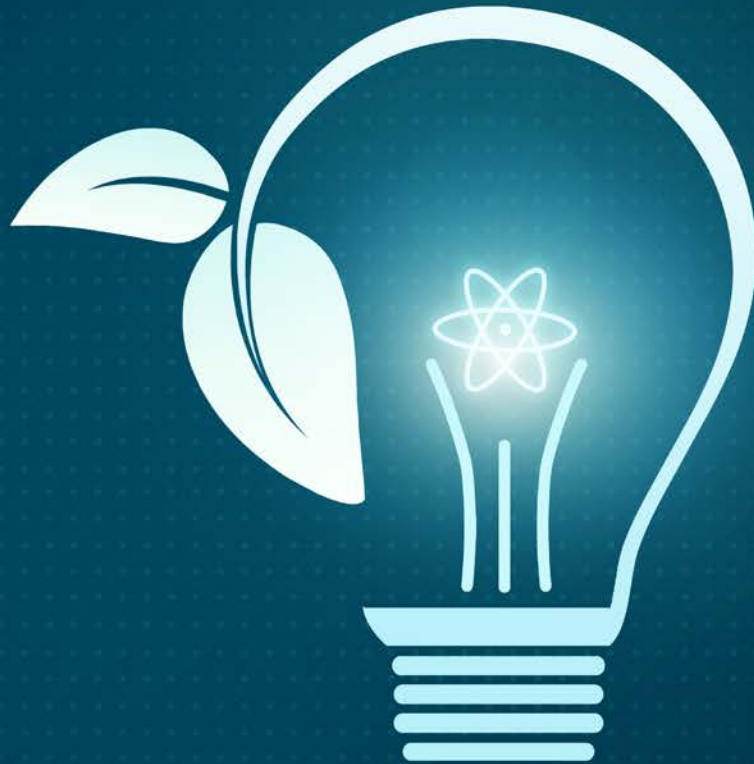


# IAEA BULLETIN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

La publicación emblemática del OIEA | Septiembre de 2020 | [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

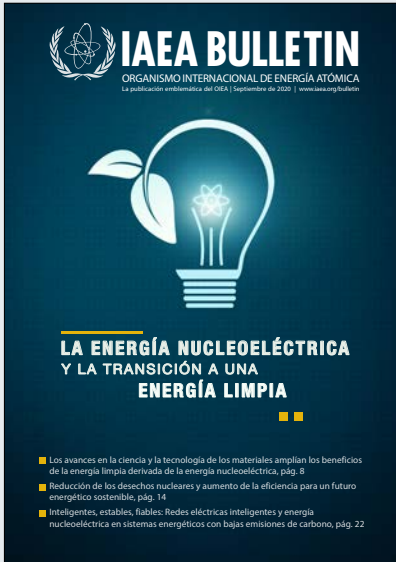


---

## LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA Y LA TRANSICIÓN A UNA ENERGÍA LIMPIA



- Los avances en la ciencia y la tecnología de los materiales amplían los beneficios de la energía limpia derivada de la energía nucleoelectrónica, pág. 8
- Reducción de los desechos nucleares y aumento de la eficiencia para un futuro energético sostenible, pág. 14
- Inteligentes, estables, fiables: Redes eléctricas inteligentes y energía nucleoelectrónica en sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono, pág. 22



### EL BOLETÍN DEL OIEA

es una publicación de la

Oficina de Información al Público  
y Comunicación (OPIC)

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre

PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

Teléfono: (43-1) 2600-0

iaeabulletin@iaea.org

Editora jefa: Nicole Jawerth

Editor: Miklos Gaspar

Diseño: Ritu Kenn

El BOLETÍN DEL OIEA puede consultarse en línea en  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Podrá reproducirse libremente parte del material del OIEA contenido en el Boletín del OIEA siempre que se cite su fuente. En caso de que el material que quiera volverse a publicar no sea de la autoría de un miembro del personal del OIEA, deberá solicitarse permiso al autor o a la organización que lo haya redactado.

Las opiniones expresadas en los artículos firmados que figuran en el Boletín del OIEA no representan necesariamente las del Organismo Internacional de Energía Atómica y este declina toda responsabilidad al respecto.

Portada: IAEA

Síganos en



La misión del Organismo Internacional de Energía Atómica es evitar la proliferación de las armas nucleares y ayudar a todos los países, especialmente del mundo en desarrollo, a sacar provecho de los usos de la ciencia y la tecnología nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.

El OIEA, creado en 1957 como organismo independiente de las Naciones Unidas, es la única organización del sistema de las Naciones Unidas especializada en tecnología nuclear. Por medio de sus laboratorios especializados, únicos en su clase, transfiere conocimientos y competencias técnicas a sus Estados Miembros en esferas como la salud humana, la alimentación, el agua, la industria y el medio ambiente.

El OIEA, que, además, proporciona una plataforma mundial para el fortalecimiento de la seguridad física nuclear, ha creado la Colección de Seguridad Física Nuclear, cuyas publicaciones ofrecen orientaciones a ese respecto que gozan del consenso internacional. La labor del OIEA se centra igualmente en ayudar a reducir al mínimo el riesgo de que los materiales nucleares y otros materiales radiactivos caigan en manos de terroristas y criminales o de que las instalaciones nucleares sean objeto de actos dolosos.

Las normas de seguridad del OIEA proporcionan un sistema de principios fundamentales de seguridad y reflejan un consenso internacional sobre lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a la población y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Esas normas han sido elaboradas pensando en que sean aplicables a cualquier tipo de instalación o actividad nuclear destinada a fines pacíficos, así como a las medidas protectoras encaminadas a reducir los riesgos radiológicos existentes.

Mediante su sistema de inspecciones, el OIEA también verifica que los Estados Miembros utilicen los materiales e instalaciones nucleares exclusivamente con fines pacíficos, conforme a los compromisos contraídos en virtud del Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares y otros acuerdos de no proliferación.

La labor del OIEA es polifacética y se realiza, con participación de muy diversos asociados, a escala nacional, regional e internacional. Los programas y presupuestos del OIEA se establecen mediante decisiones de sus órganos rectores: la Junta de Gobernadores, compuesta por 35 miembros, y la Conferencia General, que reúne a todos los Estados Miembros.

El OIEA tiene su sede en el Centro Internacional de Viena y cuenta con oficinas sobre el terreno y de enlace en Ginebra, Nueva York, Tokio y Toronto. Además, tiene laboratorios científicos en Mónaco, Seibersdorf y Viena. Por otra parte, proporciona apoyo y financiación al Centro Internacional de Física Teórica "Abdus Salam", en Trieste (Italia).

# La creación de un futuro basado en la energía limpia

**Rafael Mariano Grossi**  
**Director General, OIEA**

Corresponde a la energía nucleoelectrica un papel esencial de ayuda en la lucha contra la emergencia climática mundial.

La energía nucleoelectrica, que aporta ya un tercio del total de la electricidad con bajas emisiones de carbono que se genera a nivel mundial, ofrece un suministro estable y fiable de energía, y su uso puede contribuir tanto a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como a atender las necesidades de una población mundial en aumento, sobre todo en los países en desarrollo.

Las centrales nucleares casi no generan emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos durante su explotación. Las emisiones son muy escasas durante todo el ciclo de vida de estas centrales, que constituyen un complemento esencial de las energías renovables, como las energías eólica y solar, que son fuentes intermitentes.

La gran contribución registrada hasta la fecha por la energía nucleoelectrica, que, por ejemplo, ha evitado en los últimos 50 años que se produzca el equivalente de 55 gigatoneladas de emisiones de dióxido de carbono, y el enorme potencial de las tecnologías innovadoras objeto de desarrollo en la actualidad son dignos de conocerse mejor.

A ello obedece mi decisión de dedicar el primer Foro Científico del OIEA tras asumir el cargo de Director General del Organismo al tema “La energía nucleoelectrica y la transición a una energía limpia”. Destacados científicos y expertos de todo el mundo se reunirán durante el curso de dos días para examinar la manera en que las soluciones científicas aportadas por la energía nucleoelectrica pueden contribuir decisivamente a allanar el camino a un futuro sostenible.

La presente edición del *Boletín del OIEA* le permitirá examinar con mayor detenimiento la transición a la energía limpia y el papel de la energía nucleoelectrica al respecto (página 4). Le mostrará la manera en que, en el curso de sucesos extremos, como una pandemia o fenómenos meteorológicos severos derivados del cambio climático, la resiliencia de la energía nucleoelectrica puede contribuir a garantizar la continuidad del suministro energético (página 6).

También podrá hacerse una idea de las innovaciones que impulsan el futuro de la energía nuclear. Los avances en la ciencia de los materiales, por ejemplo, contribuyen al funcionamiento de las centrales nucleares en condiciones de seguridad, sostenibilidad y eficacia en relación con los costos por períodos mucho más extensos de lo que se había planificado inicialmente (página 8). Gracias, en

parte, a nuevos conceptos, tecnologías y materiales, los reactores rápidos prometen una producción energética más eficiente y con muchos menos desechos (página 14). Los grandes reactores nucleares avanzados (página 11) y los reactores modulares pequeños y los microrreactores (página 16), que cuentan con diseños y características de seguridad mejorados, ofrecen a los países una gama más amplia de opciones a efectos de emplear la energía nucleoelectrica para atender sus necesidades energéticas y climáticas.

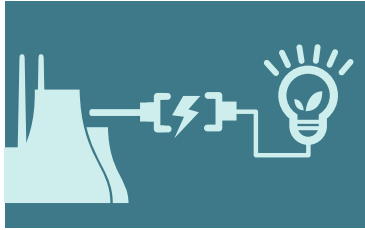


La repercusión de la innovación va más allá de la producción de energía nucleoelectrica. Una serie de políticas de financiación de carácter progresista contribuyen a superar los obstáculos económicos a los nuevos proyectos nucleoelectricos (página 24). La tecnología “inteligente”, como la inteligencia artificial y el “Internet de las cosas”, combinada con la energía nucleoelectrica, dota de mayor eficiencia, estabilidad y fiabilidad a las redes energéticas provistas de una proporción alta de energías renovables (página 22). Las aplicaciones no eléctricas que hacen uso de instalaciones de energía nucleoelectrica, como en el caso de la producción de hidrógeno, están ampliando los beneficios de la energía nucleoelectrica en cuanto a la baja emisión de carbono a sectores como la industria y el transporte (página 18).

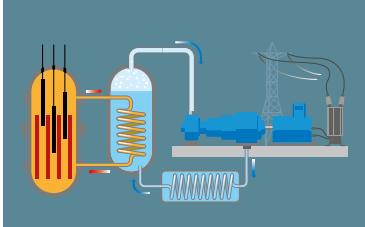
Los avances de la tecnología nucleoelectrica deben ir acompañados de progresos en materia de seguridad nuclear tecnológica y física y salvaguardias. Se está estableciendo un nuevo marco regulador tecnológicamente neutro que permita innovar en el ámbito de las tecnologías nucleoelectricas sin poner en peligro la seguridad (página 26). Una tecnología que es objeto de desarrollo en la esfera de las salvaguardias consiste en redes neurales que ayudan a los analistas a hacer un uso más eficaz y efectivo de su tiempo al examinar los datos de vigilancia reunidos en el marco de actividades de verificación dirigidas a impedir la propagación de las armas nucleares (página 28).

El logro del desarrollo sostenible y el cumplimiento de los objetivos climáticos plantearán enormes dificultades. La energía nucleoelectrica es una tecnología madura de eficacia comprobada que puede contribuir en gran medida. El OIEA seguirá haciendo todo lo posible por facilitar la transición a un futuro basado en la energía limpia en todo el mundo mediante el uso de tecnología nuclear.





**1 La creación de un futuro basado en la energía limpia**



**4 ¿Qué es la transición a una energía limpia y cómo encaja la energía nucleoelectrónica?**



**6 La resiliencia y la seguridad de la energía nucleoelectrónica ante los sucesos extremo**



**8 Los avances en la ciencia y la tecnología de los materiales amplían los beneficios de la energía limpia derivada de la energía nucleoelectrónica**



**11 Los reactores avanzados ayudan a allanar el camino para cumplir los objetivos climáticos gracias a la energía nucleoelectrónica**



**14 Reducción de los desechos nucleares y aumento de la eficiencia para un futuro energético sostenible**



**16 Pequeños reactores, gran potencial**



### **18 Más que una fuente de electricidad sin más**

Producción de hidrógeno mediante energía nuclear para un futuro con bajas emisiones de carbono



### **22 Inteligentes, estables, fiables**

Redes eléctricas inteligentes y energía nucleoelectrica en sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono



### **24 Invertir en la transición a una energía limpia**

Financiación y apoyo económico para la energía nucleoelectrica



### **26 Seguridad y concesión de licencias para reactores modulares pequeños**

Un enfoque tecnológicamente neutro



### **28 Evolución orientada al futuro**

Las salvaguardias y la energía nucleoelectrica

Panorama mundial

### **30 Profundización en la descarbonización mediante la energía nuclear**

— Kirsty Gogan and Eric Ingersoll

Actualidad del OIEA

### **32 Noticias**

### **36 Publicaciones**

# ¿Qué es la transición a una energía limpia y cómo encaja la energía nucleoelectrica?

Nicole Jawerth

El planeta necesita energía para sustentar la vida diaria e impulsar el desarrollo humano y económico. En 2019 se produjeron más de 26 000 teravatios-hora de electricidad en todo el mundo. Esta electricidad se genera a partir de varias fuentes de energía, principalmente combustibles fósiles, pero también mediante energía nucleoelectrica y energías renovables, como la energía solar, hidroeléctrica y eólica.

La producción y utilización de energía son la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Dado que los gases de efecto invernadero son uno de los motores del cambio climático, los países de todo el mundo están trabajando de manera activa en la transición a una energía limpia modificando el modo en que se produce energía.

Veamos más de cerca la transición a una energía limpia y el papel que desempeña la energía nucleoelectrica.

## ¿Qué es la “transición a una energía limpia”?

La transición a una energía limpia supone abandonar la producción de energía a partir de fuentes que emiten una gran cantidad de gases de efecto invernadero, como los combustibles fósiles, y adoptar otras que emiten pocos gases de efecto invernadero o ninguno. La energía nucleoelectrica, hidroeléctrica, eólica y solar se encuentran entre estas fuentes limpias.

El rumbo de la transición mundial a una energía limpia se estableció en el Acuerdo de París, tratado internacional entre más de 180 países que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El objetivo principal del acuerdo es limitar el aumento de la temperatura media mundial para que quede muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, fomentando el uso de fuentes de energía bajas en carbono para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Teniendo en cuenta que cerca de dos tercios de la electricidad del mundo siguen generándose a partir de la quema de combustibles fósiles, es preciso que al menos el 80 % de la electricidad pase a producirse a partir de fuentes de energía bajas en carbono a fin de lograr estos objetivos climáticos para 2050, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE).

## ¿Qué son los gases de efecto invernadero, el calentamiento global y el cambio climático?

Los gases de efecto invernadero son gases presentes en la atmósfera terrestre que retienen y liberan calor. Entre ellos se incluyen el dióxido de carbono, el metano, el vapor de agua,

el óxido nitroso y el ozono. Estos gases absorben calor y lo devuelven irradiado a la Tierra, lo que provoca el aumento de la temperatura media del planeta.

Si bien algunos gases de efecto invernadero provienen de fuentes naturales, en la actualidad la mayoría tienen origen humano. Desde la Revolución Industrial, a finales del siglo XIX, las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado debido a la intensificación de las actividades humanas, fundamentalmente cuando se queman combustibles fósiles, como por ejemplo al conducir un automóvil de gasolina o al quemar carbón para generar calor. Cuando se queman combustibles fósiles, liberan dióxido de carbono.

Los gases de efecto invernadero llevan más de 100 años acumulándose mucho más rápido de lo que pueden diluirse, lo cual, según las teorías científicas más reconocidas, ha acelerado el aumento de la temperatura media mundial. Esto se denomina calentamiento global.

El calentamiento global provoca cambios ambientales, como pautas meteorológicas más extremas, precipitaciones irregulares, sequías y cambios estacionales imprevisibles, fenómenos que se conocen como cambio climático. Dado el actual ritmo acelerado del calentamiento global, se prevé que el cambio climático y sus efectos se agudicen y dificulten más la vida en la Tierra.

## ¿Cómo encaja la energía nucleoelectrica en la transición a una energía limpia?

La energía nucleoelectrica es, después de la energía hidroeléctrica, la segunda fuente principal de energía baja en carbono que se utiliza en la actualidad para producir electricidad. Durante la explotación, las centrales nucleares apenas emiten gases de efecto invernadero. Según la AIE, el empleo de energía nucleoelectrica ha reducido las emisiones de dióxido de carbono en más de 60 gigatoneladas en los últimos 50 años, lo que equivale a casi dos años de emisiones relacionadas con la energía a escala mundial.

La energía nucleoelectrica representa alrededor del 10 % de la electricidad del mundo y cerca de un tercio de la electricidad con bajas emisiones de carbono a nivel mundial. Actualmente hay 440 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en 30 países, y 54 reactores en construcción en 19 países, de los cuales 4 están construyendo sus primeros reactores nucleares.

Al poder funcionar a plena capacidad casi sin interrupción, las centrales nucleares pueden ofrecer un suministro continuo y fiable de energía. Esto contrasta con las fuentes de energía renovables variables, como la

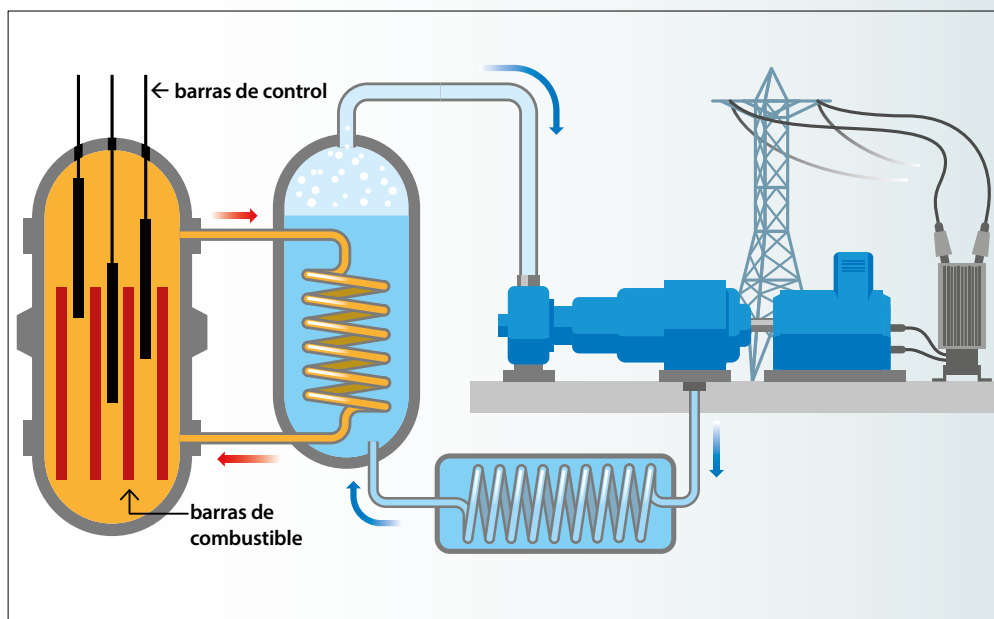


Diagrama simplificado de un reactor de agua a presión. (Gráfico: iStock.com/jack0m)

energía solar y eólica, que necesitan energía de reserva durante las intermitencias de la producción, como cuando se pone el sol o el viento deja de soplar.

Las centrales nucleares también pueden funcionar de manera flexible en respuesta a las fluctuaciones en la demanda de energía y dotar de estabilidad a las redes eléctricas, en particular a aquellas donde es grande la proporción de fuentes de energía renovables variables (véase la página 22). En la actualidad se están diseñando algunas centrales nucleares para ofrecer también servicios no eléctricos, como la producción de hidrógeno. Estos servicios pueden ayudar a descarbonizar otros sectores, además de la producción de electricidad (véase la página 18).

Los constantes avances en las tecnologías nucleoelectricas han dado lugar a diseños de reactores innovadores, avanzados y de la siguiente generación que están contribuyendo a hacer de la energía nucleoelectrica una opción más eficiente, asequible y atractiva para la descarbonización (véase la página 11). También se prevé que una nueva era de diseños de reactores más pequeños, flexibles y, en algunos casos, transportables contribuya a que la energía nucleoelectrica y sus aplicaciones no eléctricas sean más accesibles y rentables, en especial en partes del mundo remotas y de difícil acceso (véase la página 16).

### ¿Cómo funciona la energía nucleoelectrica?

La energía nucleoelectrica es electricidad producida mediante la liberación controlada de energía nuclear, que es la energía que mantiene unido el “centro” de los átomos, denominado núcleo. La energía nuclear se libera, en última instancia como calor, mediante fisión nuclear, es decir, el proceso por el cual se dividen los núcleos de materiales específicos. El material empleado con mayor frecuencia es el uranio, metal pesado débilmente radiactivo que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre.

Normalmente el uranio se carga en barras de combustible, a menudo después de haber sido enriquecido para aumentar su capacidad de fisión, y las barras se colocan dentro de un reactor nuclear.

Cuando se utilizan en un reactor de agua a presión, que es el tipo de reactor nuclear de potencia más habitual actualmente en la explotación a escala mundial, las barras de combustible se colocan dentro de la vasija del reactor, que se llena de agua. En la vasija, las barras de combustible se bombardean con partículas nucleares denominadas neutrones, generados inicialmente por un dispositivo (fuente de neutrones) situado dentro del reactor. Estos neutrones provocan la división de los núcleos de uranio en las barras de combustible, lo cual libera energía y neutrones. Estos neutrones recién liberados hacen que otros núcleos de uranio en las barras de combustible se dividan, y así sucesivamente, lo cual genera una reacción de fisión nuclear en cadena.

En los reactores de agua a presión, la energía liberada durante la fisión nuclear calienta las barras de combustible y el agua que las rodea. El agua se mantiene a presión para evitar que hierva, en lugar de lo cual el calor se saca mediante un tubo para hervir agua en una vasija cercana. El agua en ebullición produce vapor que se usa para hacer girar una turbina enorme a velocidades muy altas. La turbina está conectada a un generador que también gira y produce electricidad. La electricidad fluye a continuación a una red eléctrica, sistema interconectado para distribuir la electricidad de los productores a los consumidores.

La fisión nuclear continúa hasta que se insertan entre las barras de combustible barras de control hechas de materiales que absorben neutrones sin generar nuevas fisiones, como el cadmio, lo cual detiene la reacción de fisión nuclear en cadena.

# La resiliencia y la seguridad de la energía nucleoelectrica ante los sucesos extremos

Matt Fisher

Las centrales nucleares se construyen para ser duraderas. Sin embargo, a la vez que crecen las probabilidades de que ocurran sucesos extremos de ámbito mundial, desde desastres naturales y la intensificación de pautas meteorológicas impulsadas por el cambio climático que podrían afectar a una central hasta el aumento de enfermedades infecciosas que podrían afectar a su personal, será fundamental que las centrales nucleares cuenten con una fuerza de trabajo adaptable y diseños robustos para mantenerse resilientes y contribuir a una vía hacia el futuro caracterizada por las bajas emisiones de carbono.

“Para que el mundo pueda mitigar el cambio climático en los próximos 20 a 30 años, es preciso que el sector de la energía se transforme fundamentalmente para convertirse en un sistema de suministro energético con bajas emisiones de carbono”, afirma Loreta Stankeviciute, Analista del OIEA en Sistemas Energéticos. “Pero, para lograrlo, el sector también debe ser capaz de resistir los sucesos extremos y los cambios en el medio ambiente y adaptarse a ellos. Gracias a su resiliencia y su historial en materia de seguridad, la energía nucleoelectrica ocupa una buena posición para ayudar a la comunidad mundial a superar estos desafíos”.

## Pandemias

La prueba de resiliencia más reciente se presentó durante la pandemia sin precedentes de COVID-19.

A raíz de la propagación del virus de la COVID-19 a todos los rincones del planeta durante la primera mitad de 2020 las sociedades y economías han sufrido un vuelco. Se adoptaron numerosas restricciones, en particular confinamientos, para controlar la propagación del virus.

“A pesar de estas restricciones a nivel mundial, las centrales nucleares de todo el mundo siguieron funcionando de manera segura. Los explotadores ejecutaron sin interrupciones planes

de contingencia, entre ellos, diversas medidas de emergencia, para seguir llevando a cabo actividades y garantizar la seguridad del personal”, indica Greg Rzentkowski, Director de la División de Seguridad de las Instalaciones Nucleares del OIEA. “Los explotadores tomaron las precauciones necesarias y aplicaron minuciosamente cambios operacionales y organizativos, sin dejar de garantizar la seguridad tecnológica y física de las centrales nucleares”.

Si bien ningún país notificó ninguna parada forzosa de un reactor nuclear de potencia por las repercusiones de la COVID-19, algunas paradas de mantenimiento programadas debieron acortarse o posponerse, previa aprobación reglamentaria, como parte de las medidas de protección de la salud que redujeron temporalmente las tareas no indispensables, según informan los explotadores. También preocupa que las perturbaciones de las cadenas de suministro relacionadas con la pandemia, como los retrasos en los servicios y los cierres temporales de los fabricantes, puedan causar demoras en los proyectos de nueva construcción o de renovación importante.

“Queda por ver la magnitud de los efectos que tendrán en la industria estas perturbaciones relacionadas con la pandemia”, comenta Dohee Hahn, Director de la División de Energía Nucleoelectrica del OIEA. “Las aportaciones que seguimos recibiendo nos brindan información crucial sobre la influencia de la pandemia en la industria nuclear y ayudarán tanto a los explotadores como a los reguladores a extraer enseñanzas recíprocas de la experiencia ajena”.

La energía nucleoelectrica, además de dar prueba de su resiliencia durante la pandemia, ha demostrado que es segura y apropiada para atender las necesidades energéticas en evolución. Desde el comienzo de la pandemia, el peso de la energía nucleoelectrica ha aumentado en algunos países, entre ellos, el Brasil, la India y Corea del Sur. En el Reino Unido,



por ejemplo, la energía nucleoelectrica ha contribuido notablemente a la reducción drástica de la cantidad de carbón que se quema para producir electricidad; la disminución de la demanda de electricidad provocada por la pandemia permitió al país cerrar temporalmente las centrales de carbón a favor de un mayor uso de la energía nucleoelectrica.

### Cambio climático

Así como la resiliencia de la fuerza de trabajo de una central ha resultado necesaria para que la explotación prosiguiera sin obstáculos durante la actual pandemia, esta resiliencia y el diseño sólido de una central nuclear también son necesarios ante los fenómenos meteorológicos extremos, en particular los derivados del cambio climático.

El cambio climático, causado por el aumento de la temperatura media mundial, está alterando la gravedad y la frecuencia de los fenómenos meteorológicos, como temperaturas extremas, períodos de precipitación intensa, vientos fuertes y aumentos importantes del nivel del mar. Está previsto que estos cambios sigan aumentando de corto a largo plazo.

“Si bien el aumento de la temperatura del agua y del aire puede plantear desafíos a la continuidad de la explotación de los reactores al limitar su capacidad de enfriamiento, las inundaciones y los vientos extremos son los que podrían llegar a afectar a la seguridad de los reactores al plantear amenazas al diseño de la instalación”, indica el Sr. Rzentkowski. “Uno de los desafíos que supone el cambio climático es que, a medida que sigue avanzando y haciendo que las condiciones sean más extremas, las anteriores observaciones y modelos predictivos pierden fiabilidad. Así pues, debemos comenzar a prever estos sucesos y reevaluar periódicamente los riesgos pertinentes para garantizar que sigan siendo adecuadas las medidas de prevención y mitigación de accidentes”.

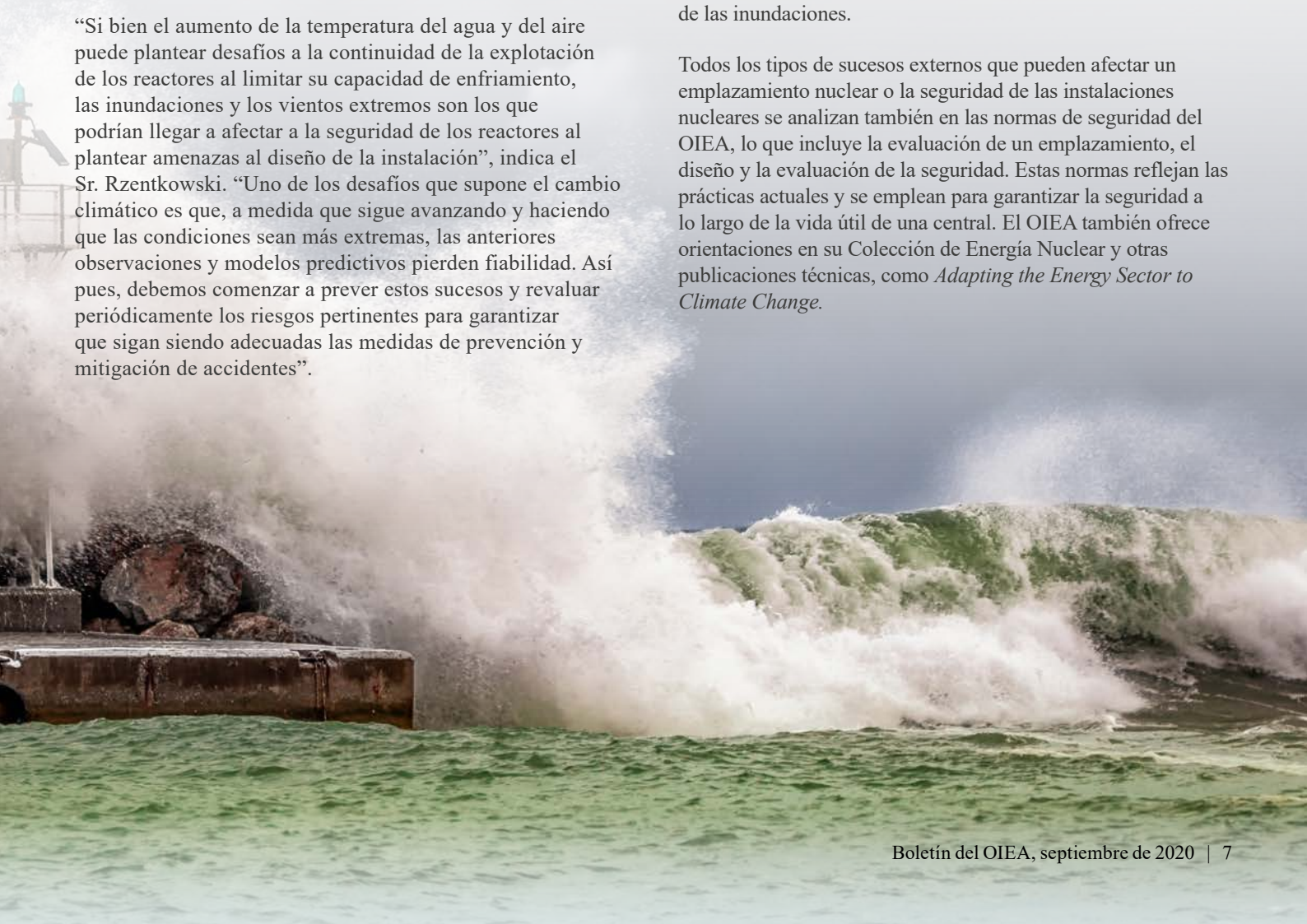
### Sucesos naturales

Las centrales nucleares también pueden verse afectadas por sucesos naturales extremos, como terremotos, tornados, la actividad volcánica, temporales de hielo e inundaciones. En circunstancias excepcionales, estos sucesos pueden llegar a ser lo suficientemente extremos como para superar la capacidad de diseño de una central nuclear.

Ejemplo de ello es el accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi, en el Japón, el 11 de marzo de 2011 como consecuencia de un tsunami derivado de un terremoto masivo. Si bien la central nuclear sufrió daños a raíz de estos sucesos y de las consiguientes explosiones de hidrógeno, no se perdieron vidas a causa del accidente.

Tras el accidente de Fukushima Daiichi, se han adoptado medidas concretas para seguir reforzando la seguridad en las centrales nucleares existentes y perfeccionar los diseños de las centrales nuevas frente a los sucesos extremos. Estas medidas incluyen, por ejemplo, opciones alternativas de enfriamiento, generadores de reserva ambientalmente calificados, escudos y precintos de protección contra el viento y diques y otras estructuras de contención para resguardar los emplazamientos de las inundaciones.

Todos los tipos de sucesos externos que pueden afectar un emplazamiento nuclear o la seguridad de las instalaciones nucleares se analizan también en las normas de seguridad del OIEA, lo que incluye la evaluación de un emplazamiento, el diseño y la evaluación de la seguridad. Estas normas reflejan las prácticas actuales y se emplean para garantizar la seguridad a lo largo de la vida útil de una central. El OIEA también ofrece orientaciones en su Colección de Energía Nuclear y otras publicaciones técnicas, como *Adapting the Energy Sector to Climate Change*.



# Los avances en la ciencia y la tecnología de los materiales amplían los beneficios de la energía limpia derivada de la energía nucleoelectrica

Carley Willis

Los avances en la ciencia y la tecnología de los materiales están ayudando a prolongar la vida útil de las centrales nucleares para que los países puedan seguir aprovechando los beneficios que reportan en forma de energía limpia.

“El costo de renovar una central nuclear para la explotación a largo plazo es mucho menor que el de construir una nueva central nuclear”, indica Ed Bradley, Jefe del Grupo del OIEA para la Explotación de Centrales Nucleares y el Apoyo de Ingeniería. “La explotación de una central nuclear a largo plazo ofrece una oportunidad excelente para mejorar la sostenibilidad de la actual generación de energía nuclear, dado que es una de las fuentes de electricidad con bajas emisiones de carbono más eficaces en relación con los costos. Con los materiales y la tecnología que tenemos hoy en día en comparación con el pasado, la energía nuclear se ha convertido en una opción atractiva y competitiva para muchos países que están intentando descarbonizarse”.

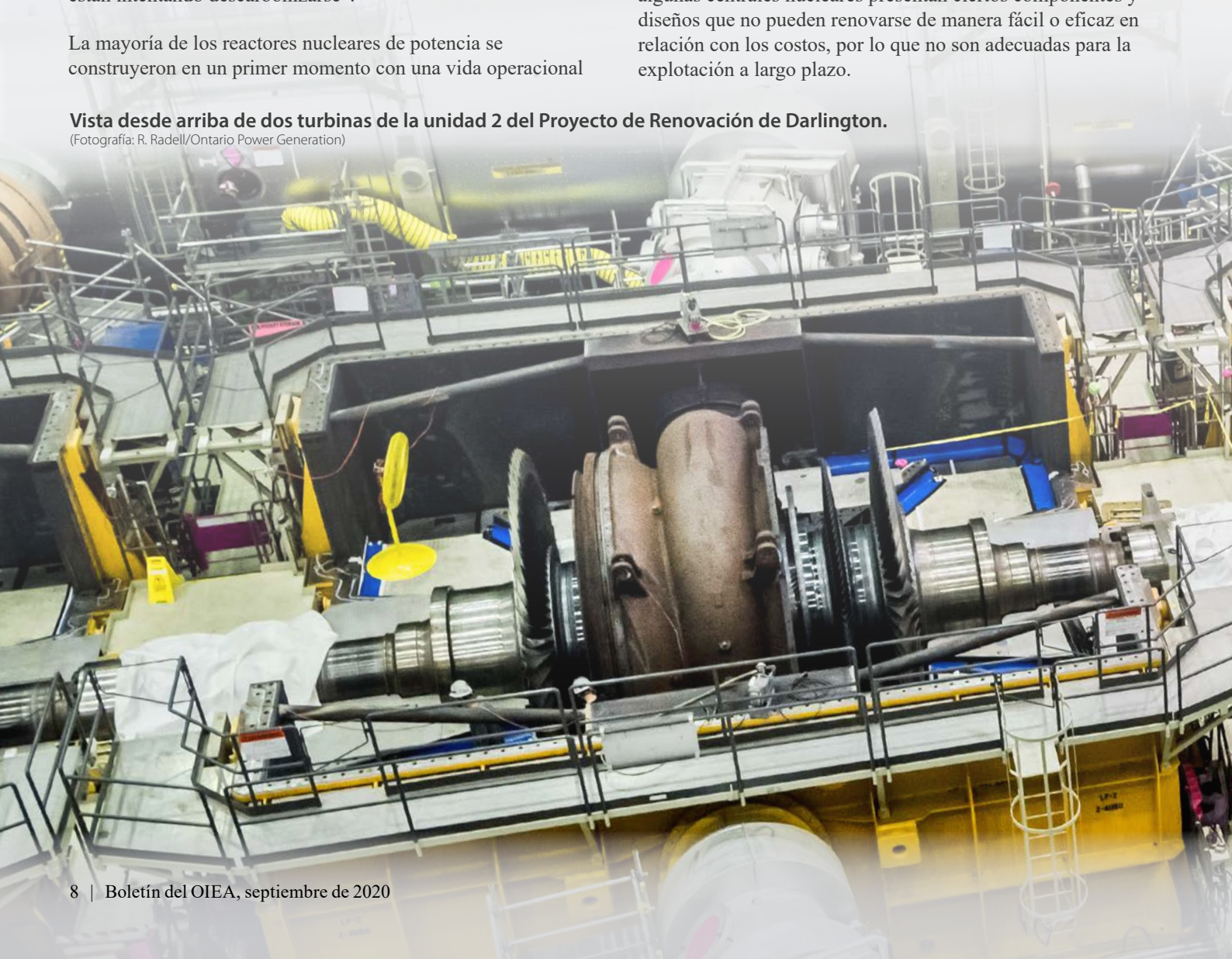
La mayoría de los reactores nucleares de potencia se construyeron en un primer momento con una vida operacional

de entre 30 y 40 años. Para prolongar la vida útil de una central nuclear es preciso evaluar una central existente y determinar si puede seguir funcionando en condiciones de seguridad tecnológica y física y de manera eficaz en relación con el costo después de la fecha asumida de retirada del servicio. Cuando se prolonga la vida útil de una central, las operaciones a menudo pueden prolongarse otros 20 a 40 años.

“Dada la extensa y minuciosa labor que se realiza durante la selección inicial del emplazamiento, el diseño y la construcción de una central nuclear, a lo cual se suma la gestión del envejecimiento a lo largo de la explotación, que conlleva determinadas renovaciones y mejoras, muchas centrales nucleares pueden seguir funcionando de manera segura bastante tiempo después del plazo de funcionamiento originalmente previsto”, afirma Robert Krivanek, Funcionario Superior de Seguridad del OIEA. Añade que, sin embargo, algunas centrales nucleares presentan ciertos componentes y diseños que no pueden renovarse de manera fácil o eficaz en relación con los costos, por lo que no son adecuadas para la explotación a largo plazo.

**Vista desde arriba de dos turbinas de la unidad 2 del Proyecto de Renovación de Darlington.**

(Fotografía: R. Radell/Ontario Power Generation)



Uno de los principales desafíos que plantea un reactor nuclear de potencia que envejece es la degradación. Durante el funcionamiento de una central, sus estructuras y componentes deben resistir temperaturas elevadas, condiciones intensas y una operación continua, lo cual puede desgastarlos con el tiempo.

“Aunque la evaluación y la sustitución periódicas de las partes pueden mitigar la degradación, puede que con el tiempo no se trate del mejor enfoque en términos económicos, especialmente en caso de explotación a largo plazo”, dice el Sr. Bradley.

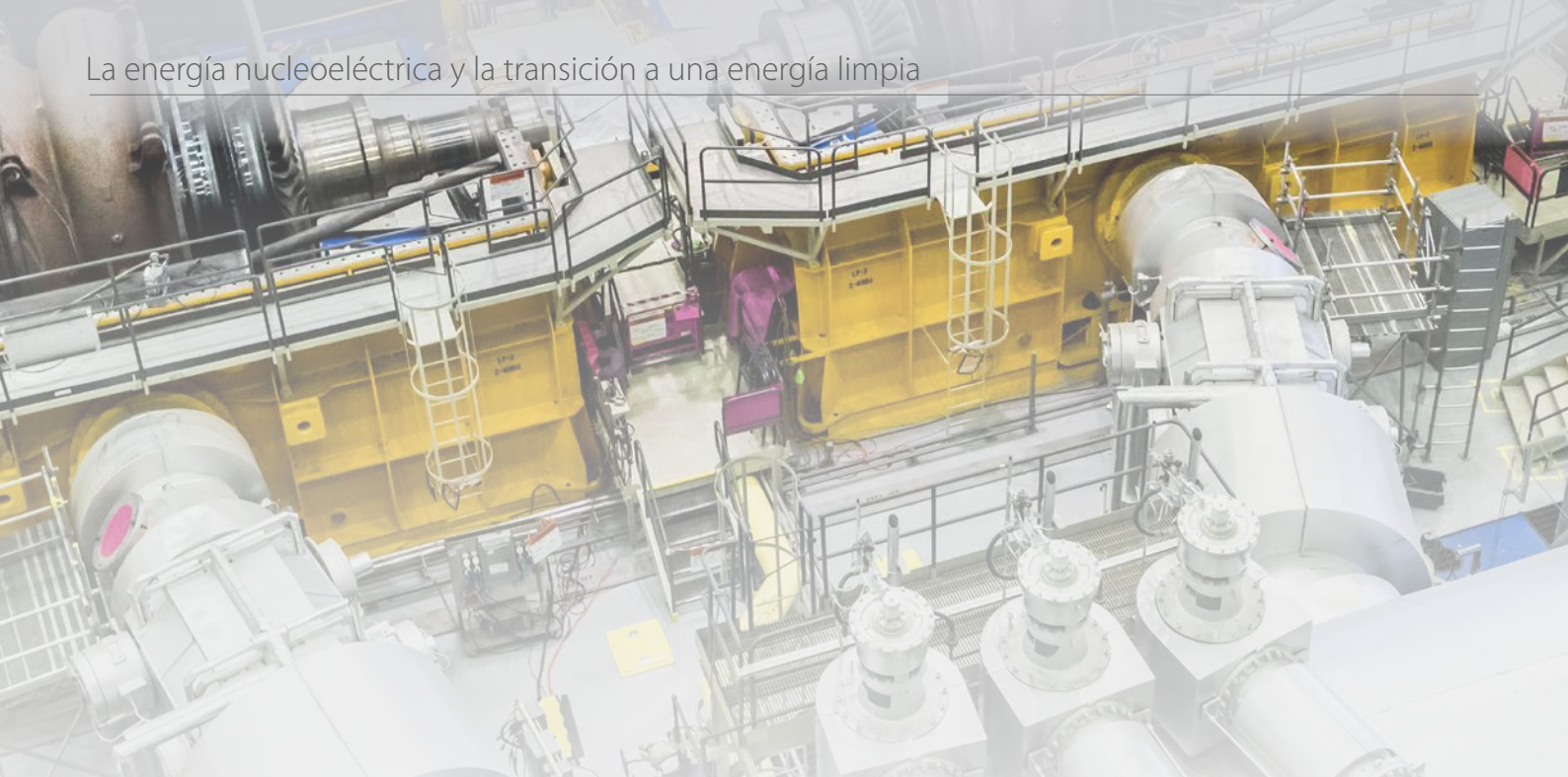
### Nuevas técnicas y materiales

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas, como la soldadura por haces de láser y la soldadura por fricción-agitación, y de materiales, como el acero inoxidable dúplex, que ofrecen mayor resistencia a la corrosión, algunos componentes ahora pueden durar más tiempo en condiciones de seguridad y, con ello, es más viable económicamente que una central nuclear pueda seguir funcionando.

Los investigadores también están alcanzando un mayor entendimiento de cómo las diferentes condiciones operacionales de una central nuclear pueden afectar a los componentes y las estructuras. Por ejemplo, en el caso de los reactores CANDU en Ontario (Canadá), que se pusieron en servicio entre 1970 y 1993, la investigación en ciencia de los materiales y el examen de los componentes han hecho posible que algunos componentes funcionen de modo seguro otros 10 años además de los 30 años previstos. Mediante un programa de renovación de 18 500 millones de dólares, la explotación volverá a prolongarse un segundo ciclo de hasta 40 años más, lo que implica que algunos reactores construidos en la década de 1980 funcionarán en condiciones de seguridad hasta la década de 2060.

“Nuestros reactores se construyeron en un momento en que no teníamos mucha experiencia en materia de centrales nucleares, y la vida útil prevista para nuestro diseño inicialmente se estimó, de forma conservadora, en 30 años”, indica Fred Dermarkar, Presidente y Director Ejecutivo del Grupo de Propietarios de Reactores CANDU, grupo





industrial de explotadores nucleares de 7 países que emplean reactores CANDU. “Al manejar esta maquinaria, conocerla y comprender cómo envejece, podemos aprovechar el enorme beneficio de seguir explotándola a largo plazo”.

El Sr. Dermarkar explicó que se está aplicando ciencia de los materiales de última generación para predecir las propiedades de los materiales hasta dentro de muchos años. “En los reactores CANDU se utilizan componentes denominados tubos de presión para enfriar el combustible. En el entorno del reactor, las propiedades de los tubos de presión cambian con el tiempo a causa del elevado flujo neutrónico y de la temperatura y la presión altas, así como de la corrosión derivada del agua refrigerante. Para predecir los cambios generados por la corrosión, por ejemplo, partimos de tubos de presión irradiados que se han extraído de reactores en funcionamiento. Luego aplicamos técnicas para acelerar artificialmente la corrosión y llevamos a cabo pruebas exhaustivas con la finalidad de determinar las propiedades de los materiales de estos componentes envejecidos de modo artificial. De esa manera, podemos demostrar hasta dónde podemos llegar con estos componentes. Estar un paso por delante en el laboratorio nos da confianza en que seguirán funcionando de forma segura y fiable hasta su fecha de renovación programada”, afirma.

### Macrodatos y energía nucleoelectrica

Los investigadores están estudiando asimismo cómo utilizar macrodatos para evaluar y determinar la viabilidad de la explotación a largo plazo de las centrales nucleares. “Macrodatos” es un término empleado para describir el análisis de grandes cantidades de datos extremadamente complejos que se recopilan muy rápido y, por lo general, en tiempo real, con el objetivo de determinar tendencias y patrones y de pronosticar resultados y comportamientos.

Para la explotación a largo plazo de una central nuclear, se recopilan millones de puntos de datos derivados de la explotación de la central, entre ellos, los registros de operaciones, las medidas del reactor y los sucesos

notificados. Al minar estos datos con software para el manejo de macrodatos nucleares, los investigadores pueden predecir, mediante herramientas de simulación, cómo es posible que envejezcan las estructuras, los sistemas y los componentes de una central en condiciones diversas, así como determinar qué partes tal vez deban reemplazarse y aproximadamente cuándo habrá que hacerlo.

“Los macrodatos no solo son el futuro: son algo actual, y están cobrando impulso”, afirma el Sr. Dermarkar. “Nuestras centrales nucleares se están modernizando y equipando con más instrumentos portátiles que pueden montarse fácilmente para recopilar datos y prever problemas desde las fases iniciales, lo cual nos permite adoptar medidas correctivas con prontitud. Ya somos testigos de los beneficios reales: el desempeño de nuestras centrales es mejor en la actualidad que en cualquier otro momento de su historia”.

Ayudar a los países a desenvolverse en medio de la explotación a largo plazo de las centrales nucleares es parte de la labor del OIEA, que elabora normas de seguridad internacionalmente reconocidas, proporciona orientación mediante publicaciones técnicas, como *Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned*, e intercambia conocimientos especializados a través de misiones de examen por homólogos de Aspectos de Seguridad de la Explotación a Largo Plazo (SALTO). El OIEA también coordina un grupo de trabajo para explotadores, reguladores y encargados de la adopción de decisiones de todo el mundo para debatir sus experiencias e intercambiar buenas prácticas.

“El principal desafío que plantea la explotación a largo plazo es mantener las normas de seguridad más estrictas y hacerlo de forma económica”, indica Garry G Young, Director de Servicios de Renovación de Licencias de Entergy Nuclear y Presidente del grupo de trabajo del OIEA sobre la explotación a largo plazo. “Nuestro grupo de trabajo estudia constantemente maneras de garantizar la eficiencia y la seguridad, así como de difundir los resultados y avances sobre el terreno para que la investigación y el desarrollo beneficien a todos al máximo”.

# Los reactores avanzados ayudan a allanar el camino para cumplir los objetivos climáticos gracias a la energía nucleoelectrica

Matt Fisher

Los reactores avanzados están ayudando a convertir la energía nucleoelectrica en una opción energética con bajas emisiones de carbono más accesible, sostenible y asequible. Se prevé que estos reactores, que presentan características de seguridad mejoradas y diseños optimizados en aras de la eficacia en relación con los costos, abran la puerta a mejoras en términos económicos, procesos de concesión de licencias más ágiles y una mayor aceptación entre el público, lo cual, en última instancia, podría contribuir a que los países se plantearan la energía nucleoelectrica como medio para alcanzar sus objetivos climáticos.

“Dado que los reactores avanzados están diseñados para funcionar seis decenios o más y que se espera que agilicen los procesos de concesión de licencias, son ideales para mitigar el cambio climático, lo cual exige una aplicación rápida y sostenibilidad a largo plazo”, indica Stefano Monti, Jefe de la Sección de Desarrollo de la Tecnología Nucleoelectrica del OIEA. “La participación y aceptación del público son fundamentales para el futuro de la energía nucleoelectrica y, a la vez que los diseños de los reactores siguen mejorando desde el punto de vista económico y de la seguridad, también lo hará la percepción de la comunidad mundial con respecto a esta fuente vital de electricidad con bajas emisiones de carbono”.

Los reactores avanzados, el combustible correspondiente y los ciclos del combustible conexos representan lo más avanzado de la tecnología nucleoelectrica. Sus diseños aprovechan más de seis decenios de investigación, desarrollo y lecciones aprendidas en materia de energía nucleoelectrica.

El OIEA colabora con los países para determinar y abordar los desafíos asociados al desarrollo de reactores avanzados, como la innovación tecnológica y los criterios de diseño de seguridad. Este apoyo incluye proyectos de investigación en equipo y actividades como talleres con expertos internacionales, así como la colaboración con el Foro Internacional de la Generación IV (GIF), iniciativa internacional de cooperación en la que actualmente participan 13 países. Desde su creación en 2000, el GIF ha llevado a cabo actividades de investigación y desarrollo para respaldar los sistemas de energía nuclear de última generación.

Algunas características distintivas de los reactores avanzados son la mejora del rendimiento térmico, la reducción al mínimo de los desechos, el uso optimizado de los recursos naturales y la capacidad de encargarse de la producción de electricidad y las aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica, como la producción de hidrógeno (véase la página 18). Estas características amplían el potencial operativo y mejoran enormemente los aspectos económicos de las centrales nucleares.

## Diseños sofisticados

Los reactores avanzados se dividen en dos categorías principales: “evolutivos” e “innovadores”. Los reactores evolutivos ofrecen una transición sólida e inmediata a la producción de energía con bajas emisiones de carbono, mientras que los reactores innovadores del futuro ayudarán en mayor medida a los países a avanzar hacia las bajas emisiones de carbono, reduciendo a la vez de manera significativa los desechos radiactivos de alta actividad y ampliando las aplicaciones no eléctricas de la energía nucleoelectrica.

Actualmente hay en funcionamiento 15 reactores evolutivos, y otros más en el horizonte. Tanto el reactor APR1400 de Corea del Sur como el reactor WWER-1200 de Rusia obedecen a diseños de reactores de agua a presión con mayor rendimiento y características de seguridad avanzadas. Además del reactor APR1400 de Corea del Sur, en la actualidad se está construyendo otro reactor de este tipo en los Emiratos Árabes Unidos, y la entrada en funcionamiento de la primera unidad está programada para 2020.

Hoy en día hay tres unidades WWER-1200 en funcionamiento en Rusia, y se están construyendo otras en Bangladesh, Belarús, Rusia y Turquía. Se prevé la puesta en servicio de otras unidades en Belarús a finales de 2020. El reactor EPR de diseño francés, que tiene dos unidades en funcionamiento en China y otras en construcción en Finlandia, Francia y el Reino Unido, va dirigido a simplificar las actividades de la central e incrementar la capacidad de generación.

El reactor HPR1000 de 1090 MW(e) de China, también conocido como Hualong 1, se está construyendo en emplazamientos de todo el país. Está previsto que se exporte a otros países, entre ellos, la Argentina y el Reino Unido, y que las primeras unidades comiencen a funcionar a fines de 2020. Este reactor incorpora sofisticados sistemas de seguridad pasiva y activa, como barras de control que se insertan exclusivamente por gravedad en caso de pérdida de energía eléctrica, y una nueva estructura de contención capaz de resistir presiones más elevadas, lo cual reduce al mínimo la posibilidad de fugas en caso de accidente nuclear.

El modelo AP1000, reactor de agua a presión de 1157 MW(e), está en funcionamiento en dos centrales nucleares en China. El diseño relativamente simple de este reactor consta de menos válvulas y presenta características que aprovechan fuerzas naturales, como el gas presurizado, el flujo por gravedad, el flujo de circulación natural y la convección, con funciones relacionadas con la seguridad. Se están construyendo unidades adicionales del AP1000 en los Estados Unidos, y está previsto que empiecen a generar electricidad para 2022.

## Innovación para la sostenibilidad

Los reactores innovadores siguen en fase de desarrollo, y es posible que la construcción de algunos diseños comience alrededor de 2030. Entre sus características de diseño comunes se incluyen temperaturas elevadas de funcionamiento, necesarias para la generación de electricidad y para otras aplicaciones no eléctricas como la producción de hidrógeno, así como características de seguridad inherentes muy sólidas, mayor sostenibilidad gracias a la reducción al mínimo de los desechos y a un uso optimizado de recursos naturales, y disposiciones especiales para mejorar la protección física y la resistencia a la proliferación.

Asimismo, está previsto que algunos diseños comprendan nuevos tipos de refrigerantes, como metal líquido o sales fundidas, que permiten a los reactores funcionar a presión ambiental y a temperaturas mucho más altas para lograr un mayor rendimiento. Otros diseños también pueden funcionar con un ciclo cerrado del combustible nuclear a fin de reducir el volumen, la toxicidad y la vida útil de los desechos radiactivos.

El reactor rápido refrigerado por sodio BN-800, que permite vislumbrar el futuro de los reactores innovadores, es uno de los tres reactores rápidos actualmente en funcionamiento a escala comercial, junto con una versión anterior conocida como el BN-600 y el Reactor Experimental Rápido de China. El BN-800 funciona en Rusia desde octubre de 2016 y emplea combustible de óxidos mixtos, que es una combinación de plutonio y uranio. Está previsto que muchos diseños de reactores innovadores funcionen conforme a un principio físico similar y lleven los límites de la tecnología nucleoelectrica al siguiente nivel. Encontrará más información sobre los reactores rápidos en la página 14.

“Si bien puede que queden bastantes años para la entrada en funcionamiento de la próxima generación de reactores nucleares de potencia a escala comercial, los progresos que siguen realizándose en las iniciativas de investigación y desarrollo son muy alentadores”, dice Dohee Hahn, Director de la División de Energía Nucleoelectrica del OIEA. “A medida que nos esforzamos por alcanzar un futuro con energía limpia, resulta evidente que la energía nucleoelectrica desempeñará un papel importante para llevarnos adonde tenemos que estar”.

## Central nuclear de Taishan en China cuenta con reactores EPR.

(Fotografía: Taishan Nuclear Power Joint Venture Co. Ltd)



## Combustibles nuevos para obtener más energía y generar menos desechos

Los investigadores están estudiando nuevas formas de alimentar los reactores nucleares con la finalidad de reducir al mínimo el impacto de los desechos nucleares y disminuir los costos de explotación y mantenimiento y, al mismo tiempo, mejorar el rendimiento de las centrales nucleares y seguir fortaleciendo la seguridad nuclear.

Un enfoque consiste en recurrir al reciclado múltiple de los restos de uranio y plutonio del combustible gastado, es decir, del combustible nuclear después de haber sido irradiado. Con este combustible reciclado se puede alimentar la próxima generación de reactores nucleares y aprovechar los recursos de manera más eficiente, a la vez que se reduce el volumen y la radiotoxicidad de los desechos nucleares. Gracias al reciclado múltiple, los reactores podrían funcionar prácticamente solo con combustible gastado reciclado, en lugar de utilizar recursos de uranio natural recién extraído.

El combustible a prueba de accidentes (ATF) es un tipo de combustible nuevo y prometedor en proceso de desarrollo para los diseños de reactores actuales y futuros. Al utilizar

materiales nuevos y mejorados para el combustible y el plaqueado (el tubo externo que rodea el combustible), el ATF puede resistir mejor a los cambios de temperatura y a las condiciones extremas de un reactor, lo cual supone, por ejemplo, que puede soportar la pérdida de refrigeración activa en el núcleo del reactor mucho más tiempo que los combustibles empleados en la actualidad.

En cuanto a los reactores avanzados, se están produciendo nuevos tipos de combustible para que duren más en el núcleo del reactor y, en consecuencia, generen más energía y menos desechos. Estos combustibles utilizan una mezcla de uranio y plutonio de mayor densidad atómica en distintos compuestos cerámicos, así como en metales y aleaciones, para aumentar el rendimiento del reactor. De este modo, el combustible resulta más adecuado para reproducir —o producir— combustible nuevo en los reactores rápidos durante la explotación. Dado que los tipos de materiales empleados en estos combustibles también transfieren el calor de manera más eficiente, la temperatura general de los combustibles se reduce y se vuelve más uniforme, lo cual aumenta la seguridad.



# Reducción de los desechos nucleares y aumento de la eficiencia para un futuro energético sostenible

Jeffrey Donovan

Los reactores de neutrones rápidos pueden aumentar el rendimiento de la energía nuclear y reducir la huella ambiental de los desechos radiactivos. Muchos países se están planteando la posibilidad de usar estos reactores innovadores para contribuir a garantizar un futuro energético sostenible.

En los reactores rápidos se emplean neutrones que no se frenan con un moderador, como el agua, para mantener la reacción de fisión en cadena. Si bien en los reactores termonucleares existentes solo se utiliza una fracción de uranio natural como combustible, los reactores rápidos pueden aprovechar casi todo el uranio del combustible para obtener hasta 70 veces más energía, con lo que se reduce la necesidad de nuevos recursos de uranio.

Los reactores rápidos también funcionan conforme a lo que se conoce como ciclo cerrado del combustible nuclear. Un ciclo cerrado del combustible tiene lugar cuando el combustible gastado —combustible nuclear después de haber sido irradiado— se recicla y reutiliza. Ese sistema energético podría resultar sostenible miles de años, a diferencia de un ciclo abierto del combustible nuclear, en el que el combustible se emplea una vez y el combustible gastado se declara desecho con fines de ulterior disposición final subterránea en repositorios geológicos.

Los reactores rápidos también pueden producir o “reproducir” más combustible del que consumen y quemar parte de los desechos contenidos en el combustible gastado, como actínidos menores, proceso que los reactores termonucleares no pueden desempeñar con eficiencia. Quemándolos se reduce de manera considerable el volumen, la toxicidad y la vida útil de los desechos radiactivos de período más largo.

**El reactor BN-800 de la central nuclear de Beloyarsk en Rusia.**

(Fotografía: Rosenergoatom)

“La huella ambiental de una fuente de energía, como sus desechos, plantea un gran interrogante para muchos países en búsqueda de maneras sostenibles de suministrar energía limpia”, afirma Amparo Espartero González, Jefa Técnica del OIEA en materia del ciclo del combustible nuclear. “La capacidad de reducir esa huella y, al mismo tiempo, aprovechar mejor el combustible nuclear es un aspecto importante del creciente interés de muchos países por los reactores rápidos y motor de su desarrollo tecnológico”.

## Vuelta a escena

Los reactores rápidos se encuentran entre las primeras tecnologías utilizadas en los albores de la energía nucleoelectrica, cuando se consideraba que los recursos de uranio eran escasos. Sin embargo, a medida que los problemas técnicos y de los materiales obstaculizaban el desarrollo y se descubrieron nuevos yacimientos de uranio, los reactores de agua ligera (LWR) terminaron por convertirse en la norma de la industria. En la actualidad, hay cinco reactores rápidos en funcionamiento: dos reactores en explotación (el BN-600 y el BN-800) y un reactor de ensayo (el BOR-60) en Rusia, el reactor reproductor rápido de ensayo (FBTR) en la India y el Reactor Experimental Rápido de China (CEFR).

Gracias a nuevos conceptos, tecnologías y avances en la investigación de materiales, junto con una visión a largo plazo de la energía nucleoelectrica como parte de la energía sostenible, la opción de los reactores rápidos está resurgiendo. Estos avances suelen ir acompañados de actualizaciones innovadoras, como características de seguridad optimizadas y diseños mejorados y más compactos centrados en la dimensión económica. Asimismo, los diseños nuevos también incluyen refrigerantes alternativos, como sal fundida, plomo, plomo-bismuto y gas.



“Los reactores rápidos llevan decenios perfeccionándose, principalmente como reactores reproductores de combustible y, en los últimos años, también como reactores modulares pequeños de batería de vida prolongada, e incluso como microrreactores”, afirma Vladimir Kriventsev, Jefe del Grupo del OIEA de Desarrollo de Tecnología de Reactores Rápidos. “Los reactores rápidos pueden convertir la energía nucleoelectrica en una fuente de energía sostenible durante miles de años y aportar mejoras considerables a la gestión de los desechos nucleares”.

### Reactores rápidos en desarrollo

Se están desarrollando reactores rápidos en todo el mundo. El OIEA desempeña un papel central en el apoyo a su desarrollo y despliegue, así como en el intercambio de información y experiencias, en especial mediante proyectos coordinados de investigación, publicaciones técnicas, grupos de trabajo técnicos y conferencias internacionales.

Rusia ya tiene en funcionamiento dos reactores rápidos refrigerados por sodio, y tiene previsto desplegar un reactor rápido comercial de 1200 MW(e) de la siguiente generación después de 2035 como parte de un sistema autosuficiente, junto con reactores de agua ligera. Con ayuda del reactor rápido, el combustible gastado de los reactores term nucleares se reprocesará y reutilizará y, con ello, la huella final de los desechos será hasta diez veces menor que la del combustible nuclear habitual.

La India pondrá en servicio un prototipo de reactor reproductor rápido refrigerado por sodio de 500 MW(e), el primero de una serie de reactores rápidos industriales que el país tiene previsto desplegar. China, que explota un reactor rápido experimental

de 20 MW(e), está construyendo un gran reactor rápido de demostración y tiene previsto desplegar más adelante reactores rápidos comerciales.

En América del Norte, se está trabajando en varios diseños de reactores rápidos que utilizan diferentes refrigerantes, como sal fundida. Los Estados Unidos tienen previsto construir un reactor rápido de ensayo para facilitar el ulterior desarrollo de la tecnología, así como un microrreactor rápido de demostración de 1,5 MW(e), que también servirá de demostración de un nuevo tipo de combustible reprocesado apto para el uso en futuros reactores innovadores.

Desde el decenio de 1950, se ha demostrado con creces la viabilidad tecnológica de los reactores rápidos. Francia explotó comercialmente el reactor Superphénix de 1200 MW(e) por 12 años hasta 1998, y sigue llevando a cabo investigación y desarrollo en la tecnología, al igual que Corea del Sur y el Japón, que prevé volver a poner en marcha un reactor rápido experimental.

No obstante, el mayor despliegue de reactores rápidos a nivel industrial dependerá en gran medida de la mejora de los aspectos económicos.

“En un mundo con recursos limitados donde se espera que el precio del uranio supere con mucho al actual y donde se hará más hincapié en la minimización de desechos, los reactores rápidos innovadores y compactos podrían volverse más competitivos económicamente que los reactores term nucleares tradicionales”, expresa Stefano Monti, Jefe de la Sección de Desarrollo de la Tecnología Nucleoelectrica del OIEA. “Dado que varios países están desarrollando activamente reactores rápidos, esperamos que en los próximos decenios contribuyan de manera importante a los sistemas de energía limpia”.

# Pequeños reactores, gran potencial

Irena Chatzis



**La instalación generadora Aurora es un diseño avanzado de central de fisión.**

(Fotografía: Oklo)

La expresión “energía nucleoelectrica” suele evocar imágenes de enormes centrales nucleares y torres de refrigeración, pero, a la vez que los reactores modulares pequeños (SMR) y los microrreactores (MR) empiezan a ser realidad, están cambiando el rostro y el alcance de este tipo de energía.

“Los SMR y los MR proporcionan energía con bajas emisiones de carbono igual que los reactores nucleares de grandes dimensiones, pero, al ser más pequeños, más flexibles y más asequibles, pueden emplearse en redes eléctricas de menor dimensión y construirse en lugares de acceso difícil donde los reactores grandes no serían prácticos”, indica Frederik Reitsma, Jefe de Grupo del OIEA de Tecnología de los SMR. “Muchos están diseñados para ofrecer servicios no eléctricos además de producir electricidad, lo cual se suma a sus beneficios en materia de energía limpia y eficacia en función de los costos”.

Se espera que los SMR generen hasta 300 megavatios (eléctricos) (MW[e]) de energía y, en el caso de los MR, hasta 10 MW(e), según los diseños. Además de su modularidad, tienen en común algunas otras características como los sistemas pasivos e integrados que mejoran la seguridad, la capacidad de generar energía de forma eficiente y flexible para satisfacer las demandas fluctuantes y los diseños más simples, que son más rápidos y menos complejos de construir que los de los reactores actuales. También ofrecen más posibilidades de producción en fábricas, lo que puede reducir el tiempo de construcción en el emplazamiento y hace que sean más fáciles y más económicos de reproducir para el despliegue adicional.

“Los grandes reactores nucleares son un proyecto importante que exige considerables inversiones a largo plazo, lo cual es viable y apropiado en algunas situaciones. En otros casos, sin embargo, los SMR y los MR pueden ser un enfoque más realista y más rápido y, a veces, la única forma de acceder a la energía nucleoelectrica de manera eficaz en relación con los costos”, dice el Sr. Reitsma. “Cuando se combina esta opción con la eficacia en la financiación y las políticas de mercado, la energía nucleoelectrica se abre a una gama más amplia de usuarios y se convierte en una opción más competitiva y atractiva en el mercado energético”. Encontrará más información sobre la financiación y las políticas de mercado relativas a la energía nucleoelectrica en la página 24.

## Primero, un SMR

El primer SMR avanzado del mundo se conectó a la red eléctrica en 2019 y comenzó a explotarse comercialmente en mayo de 2020.

La central nuclear flotante Akademik Lomonosov, ubicada justo frente a la costa ártica de Rusia, aloja dos unidades SMR KLT40S de 35 MW(e) que están generando suficiente energía para abastecer a una ciudad de alrededor de 100 000 habitantes. La central también tiene una capacidad calorífica de 50 gigacalorías por hora y se utiliza para la desalación del agua de mar, gracias a la cual se obtienen hasta 240 000 metros cúbicos de agua potable por día.

“Con la ayuda de los reactores nucleares pequeños, el Ártico podría alcanzar cero emisiones netas ya en 2040”, afirma Anton Moskvín, Vicepresidente de Mercadotecnia y

Desarrollo Empresarial de Rusatom Overseas. “Akademik Lomonosov sustituirá a una central que quema lignito. Además de contribuir a eliminar las emisiones nocivas en el ecosistema del Ártico, la central garantizará que los habitantes de la región no se queden sin electricidad y calefacción en el helado Extremo Norte”.

Entre otros SMR en la etapa más avanzada de construcción se encuentran el reactor CAREM de 30 MW(e) en la Argentina y el HTR-PM de 210 MW(e) en China. Asimismo, muchos se encuentran en fases bastante avanzadas del proceso de reglamentación, entre ellos, el SMR de NuScale Power en los Estados Unidos y varios en el Canadá. En total, hay más de 70 diseños de SMR en distintas etapas de desarrollo a nivel mundial.

El OIEA lleva a cabo diversas actividades relacionadas con los SMR con fines de apoyo a las tareas de investigación y desarrollo en todo el mundo, facilita la cooperación para el diseño, el desarrollo y el despliegue de SMR y actúa como centro de intercambio de conocimientos y experiencias en el ámbito de la reglamentación de los SMR.

### Microinstalaciones generadoras

Si bien los diseños de SMR suelen basarse en familias de reactores conocidas, los MR son lo que uno esperaría ver en una película de ciencia ficción. Estos reactores son suficientemente pequeños para que toda la central se construya en una fábrica y se transporte en camión. Al contar con sistemas de seguridad pasiva autorregulables, solo necesitan una fuerza de trabajo reducida para funcionar y, como funcionan independientemente de la red eléctrica, pueden trasladarse y utilizarse en distintos lugares. Son capaces de generar hasta 10 MW(e) de energía, equivalentes a unos 10 años o más de electricidad para más de 5 000 viviendas 24 horas al día.

Estos reactores compactos y móviles pueden servir de suministro de energía de reserva para lugares como hospitales o sustituir a generadores eléctricos que a menudo están alimentados con diésel y son la única fuente de electricidad para las comunidades remotas y los emplazamientos industriales y de extracción.

En la actualidad, empresas privadas y grupos de investigación están desarrollando más de una decena de MR a escala mundial.

Un MR que está por desplegarse es el reactor de espectro de neutrones rápidos Aurora de 1,5 MW(e) desarrollado por Oklo, empresa emergente con sede en los Estados Unidos. Aurora, que hoy en día se encuentra en proceso de reglamentación, está diseñado para funcionar y autorregularse principalmente mediante fenómenos físicos naturales y, en consecuencia, tiene muy pocas partes móviles, lo que aumenta la seguridad. También está previsto que pueda funcionar durante decenios sin recarga de combustible, utilizando uranio poco enriquecido de alta concentración.

“La reacción de fisión puede utilizarse de muchas maneras: a gran y a pequeña escala, con diferentes combustibles o empleando distintos métodos de refrigeración, y permite muchos tipos distintos de modelos de negocio, interacción con la comunidad y propiedad”, sostiene Caroline Cochran, Directora de Operaciones de Oklo. “El empleo novedoso de la fisión y la explotación de centrales distribuidas más pequeñas pueden potenciar el desarrollo humano y minimizar el empleo de recursos”.

Entre los otros MR en etapas avanzadas se encuentra un reactor de 4 MW(e) desarrollado por U-Battery, empresa con sede en el Reino Unido dirigida por URENCO, cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2028.

### Despliegue a gran escala

A pesar de los avances, los SMR y los MR están todavía lejos del despliegue a gran escala.

“Es el problema del huevo y la gallina”, explica el Sr. Reitsma. “Por un lado, las inversiones para desarrollar y desplegar SMR exigen un mercado y una demanda del producto garantizados, pero, por otro, no se puede garantizar el mercado sin financiación para desarrollar y demostrar el producto o incluso llevar a cabo las investigaciones necesarias o construir las instalaciones de prueba que pueden ser necesarias para la concesión de licencias. Los posibles inversores dudan a la hora de invertir en tecnología nueva si no tienen claros los riesgos de mercado”.

Uno de los mayores obstáculos al despliegue es la aplicación de reglamentos a los diversos diseños de SMR y MR. La variada combinación de estructuras, sistemas y componentes implica que los enfoques habituales de reglamentación establecidos para las centrales nucleares convencionales, deban revisarse y, en última instancia, ajustarse para garantizar un nivel de seguridad adecuado. En la página 26 puede obtenerse más información sobre el proceso de reglamentación de los SMR.

“En este momento, muchos SMR avanzados que son pioneros en su género se encuentran en proceso de reglamentación; una vez finalizada esa etapa, por lo general prevemos que transcurran entre cuatro y cinco años más hasta su construcción y entrada en funcionamiento”, señala el Sr. Reitsma. “Pero, a medida que se generalice la opción de los SMR y MR, podemos esperar que este plazo se reduzca y que los procesos de despliegue se vuelvan más rápidos, rentables y sencillos”.

# Más que una fuente de electricidad sin más

## Producción de hidrógeno mediante energía nuclear para un futuro con bajas emisiones de carbono

Matt Fisher

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo, pero producirlo en forma pura para diversos procesos industriales exige una gran intensidad energética y deja una importante huella de carbono.

“Casi el 95 % de la demanda actual de hidrógeno se satisface utilizando procesos productivos intensivos en carbono, como el reformado de metano con vapor. Esto es insostenible a la luz de la transición mundial a una energía limpia, especialmente teniendo en cuenta que la demanda ya es bastante alta y sigue creciendo”, afirma Ibrahim Khamis, ingeniero nuclear superior del OIEA. La demanda de hidrógeno se ha triplicado con creces desde 1975, según la Agencia Internacional de Energía.

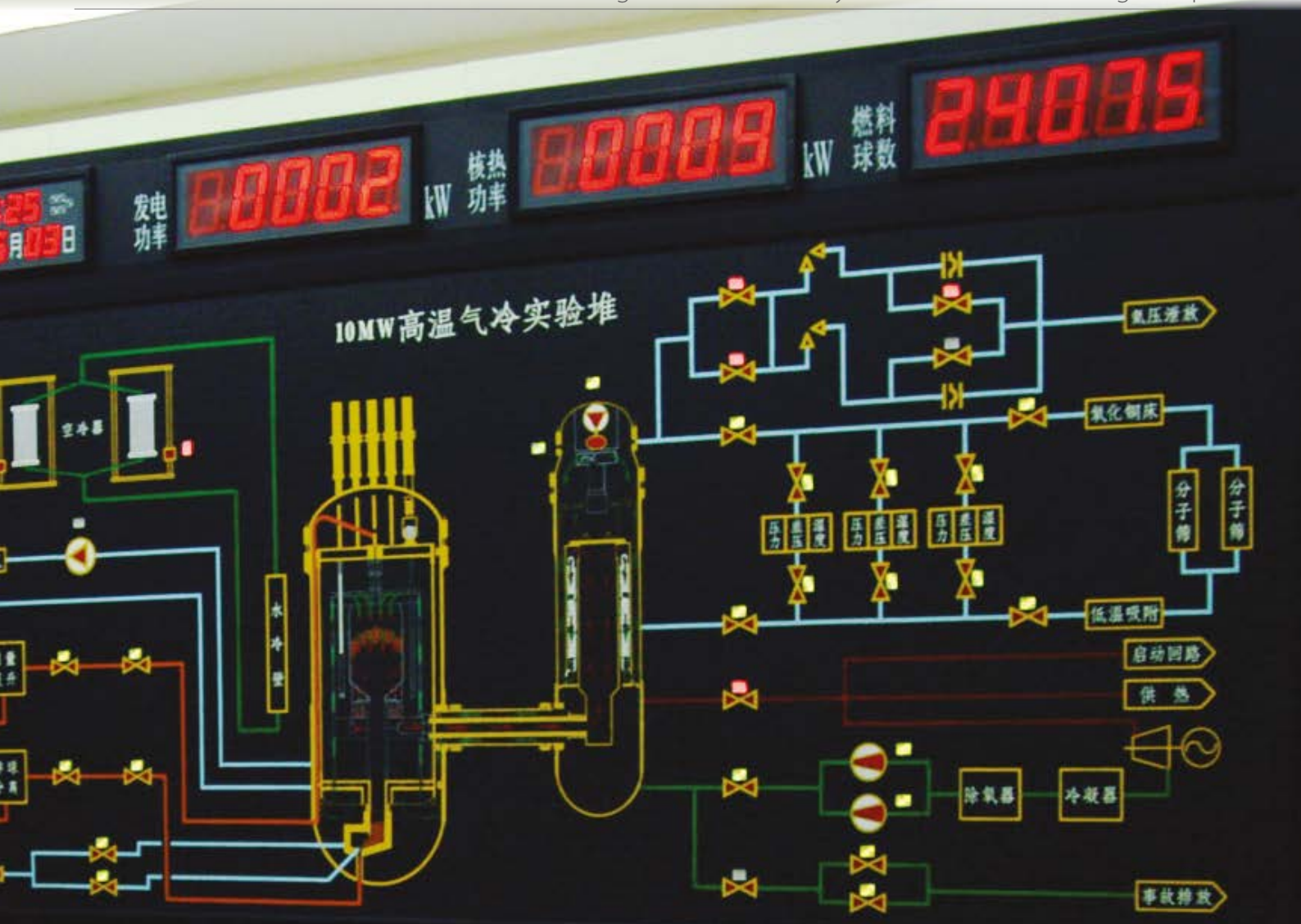
El hidrógeno se emplea en procesos industriales que van desde la producción de combustibles sintéticos y productos petroquímicos hasta la fabricación de semiconductores y la alimentación de vehículos eléctricos con pilas de combustible. A fin de reducir el impacto ambiental de la producción anual de más de 70 megatoneladas de hidrógeno, algunos países dirigen la mirada a la energía nucleoelectrica.

“Si, por ejemplo, solo el 4 % de la actual producción de hidrógeno pasara a generarse mediante energía nucleoelectrica, las emisiones de dióxido de carbono se reducirían al año en hasta 60 megatoneladas”, indica el Sr. Khamis. “Y, si todo el hidrógeno se produjera utilizando energía nuclear, podríamos plantearnos la eliminación de más de 500 megatoneladas anuales de emisiones de dióxido de carbono”.

Sala de control del reactor HTR-10 en la Universidad de Tsinghua en Beijing.

(Fotografía: P. Pavlicek/OIEA)





Los reactores nucleares de potencia pueden combinarse con una planta de producción de hidrógeno para obtener de modo eficiente energía e hidrógeno en un sistema de cogeneración. Para la producción de hidrógeno, el sistema de cogeneración se equipa con componentes para electrólisis o procesos termoquímicos. La electrólisis es el proceso de inducir la división de las moléculas de agua mediante una corriente eléctrica directa para producir hidrógeno y oxígeno. La electrólisis del agua tiene lugar a temperaturas relativamente bajas de alrededor de 80 °C a 120 °C, mientras que la electrólisis del vapor ocurre a temperaturas mucho más elevadas, por lo que es más eficiente. La electrólisis del vapor podría ser ideal para la integración con centrales nucleares avanzadas de alta temperatura, ya que el proceso requiere una aportación de calor de alrededor de 700 °C a 950 °C.

Por medio de procesos termoquímicos se puede obtener hidrógeno induciendo reacciones químicas con determinados compuestos a altas temperaturas para dividir las moléculas de agua. Los reactores nucleares avanzados capaces de funcionar a temperaturas muy elevadas también pueden emplearse para generar calor destinado a estos procesos.

“La producción de hidrógeno mediante, en particular, el ciclo de azufre-yodo ofrece grandes posibilidades de ampliación para la explotación sostenible a largo plazo”, dice el Sr. Khamis. “El desarrollo de este método utilizando el diseño del reactor HTTR del Japón y los diseños de HTR-PM 600 y HTR-10 de China es muy prometedor y, gracias a otras iniciativas de investigación, se siguen registrando excelentes progresos”.

Varios países están llevando a cabo o estudiando la producción de hidrógeno mediante centrales nucleares para contribuir a descarbonizar sus sectores energético, industrial y del transporte. Ello representa también una manera de sacar más partido a una central nuclear, lo que puede ayudar a aumentar su rentabilidad.

El OIEA presta apoyo a los países interesados en la producción de hidrógeno por medio de iniciativas como proyectos coordinados de investigación y reuniones técnicas. Asimismo, elaboró el Programa de Evaluación Económica del Hidrógeno (HEEP), instrumento para examinar los aspectos económicos de la producción de hidrógeno a gran escala mediante energía nuclear. El OIEA también presentó a principios de 2020 un curso de aprendizaje virtual sobre la producción de hidrógeno mediante cogeneración nuclear.

“La producción de hidrógeno utilizando centrales nucleares ofrece un gran potencial de contribuir a los esfuerzos de descarbonización, pero primero deben abordarse varios desafíos, como determinar la viabilidad económica de incorporar la producción de hidrógeno en una estrategia energética más amplia”, apunta el Sr. Khamis. “La producción de hidrógeno mediante procesos termoquímicos de disociación del agua exige reactores innovadores que funcionen a temperaturas muy elevadas cuyo despliegue no

será posible hasta dentro de unos años. Del mismo modo, el proceso de azufre-yodo todavía necesita algunos años más de investigación y desarrollo para alcanzar la madurez y reunir las condiciones para su expansión a escala comercial”. La concesión de licencias a los sistemas de energía nuclear que incorporan aplicaciones no eléctricas también puede plantear desafíos, añade.

### Estudios y ensayos de la viabilidad

En la iniciativa H2@Scale, que el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos puso en marcha a principios de 2020, se está examinando la viabilidad de desarrollar sistemas de energía nuclear que producen hidrógeno a la vez que electricidad con bajas emisiones de carbono. Entre las decenas de proyectos que se financian a través de esta iniciativa, se encuentra uno que será ejecutado por tres compañías eléctricas comerciales de los Estados Unidos en colaboración con el Laboratorio Nacional de Idaho del DOE. El proyecto incluirá evaluaciones técnicas y económicas, así como demostraciones piloto de la producción de hidrógeno en varias centrales nucleares de todo el país.

Una de las compañías eléctricas participantes en el proyecto, Exelon, que es el principal productor de electricidad con bajas emisiones de carbono de los Estados Unidos, está adoptando medidas para instalar un electrolizador de membrana de electrolito polimérico de un megavatio y la infraestructura conexas en una de sus centrales nucleares. El sistema, que podría estar en servicio para 2023, se usará para demostrar la viabilidad económica del hidrógeno producido electrolíticamente para satisfacer las necesidades in situ de los sistemas relacionados con la generación de energía eléctrica, así como las futuras oportunidades de escalabilidad.

“Este proyecto servirá para ayudarnos a determinar las perspectivas de producción de hidrógeno por medios nucleares, en especial la forma en que las consideraciones financieras podrían afectar a ese tipo de producción a largo plazo y a gran escala”, comenta Scot Greenlee, Vicepresidente Superior de Servicios Técnicos y de Ingeniería de Exelon Generation. “Integrar la producción de hidrógeno con la energía nucleoelectrica puede contribuir en gran medida a mejorar la sostenibilidad de este tipo de energía en el marco de la planificación de un futuro con bajas emisiones de carbono”.

También se están realizando evaluaciones en el Reino Unido. Mediante Energy Systems Catapult, iniciativa sin fines de lucro de este país, se está elaborando un modelo para todo el sistema energético, que en la actualidad ofrece la opción de aplicar tecnologías nucleares avanzadas a la producción de hidrógeno. Con ello puede vislumbrarse la canasta de energía potencialmente menos costosa que podría hacer realidad el objetivo de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050, y los resultados indican que la energía nuclear avanzada podría contribuir a la producción de hidrógeno junto con otras tecnologías.

## Más que hidrógeno

La energía nucleoelectrica tiene diversas aplicaciones no eléctricas además de la producción de hidrógeno. Entre ellas figuran la calefacción urbana de viviendas y empresas, la calefacción y refrigeración con fines industriales y la desalación del agua de mar para mejorar la disponibilidad de agua potable.

La posible adopción de estas aplicaciones también está ampliándose gracias al diseño de nuevos sistemas de energía nuclear para optimizar los usos combinados eléctricos y no eléctricos, así como la integración con las fuentes renovables. Asimismo, se están elaborando nuevos diseños de reactores, como reactores modulares pequeños, para que la explotación sea más flexible al permitir que la potencia de salida se ajuste de acuerdo con la demanda. Gracias a ello resultan especialmente apropiados para dichas aplicaciones, ya que la energía que suele emplearse para la producción de electricidad puede redirigirse a aplicaciones no eléctricas.



### La Central Nuclear Davis-Besse en Ohio producirá hidrógeno mediante energía nuclear.

(Fotografía: B. Rayburn/Davis-Besse Nuclear Power Station)

“Si bien aún queda por determinar el papel exacto del hidrógeno en el Reino Unido, el análisis que llevaron a cabo el Comité sobre el Cambio Climático y el Departamento de Empresas, Energía y Estrategia Industrial sugiere que tal vez debamos desplegar alrededor de 270 teravatios-hora de hidrógeno con bajas emisiones de carbono para 2050, aunque esta cuantía podría aumentar considerablemente en función de las aplicaciones en los sectores eléctrico, de la calefacción y del transporte para las que, en última instancia, se utilice el hidrógeno”, indica Philip Rogers, Asesor Estratégico y Económico Superior de la Junta Consultiva de Innovación e Investigación Nucleares del Reino Unido.

### Nuevos programas

En 2019 Rusia puso en marcha su primera iniciativa de producción de hidrógeno por medios nucleares. El programa, dirigido por la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom”, utilizará electrólisis nuclear y generación

termoquímica mediante reactores de alta temperatura refrigerados por gas con la finalidad de generar grandes cantidades de hidrógeno al año y apartarse de la producción basada en métodos intensivos en carbono, como el reformado de metano con vapor.

El hidrógeno obtenido se destinará al consumo interno y a las exportaciones. Se está realizando una evaluación de la viabilidad para exportar parte del hidrógeno al Japón.

“Dado que la demanda de hidrógeno sigue creciendo, en parte como consecuencia de la expansión de industrias como la metalúrgica, la producción de hidrógeno mediante energía nuclear ofrece una oportunidad de recortar drásticamente las emisiones de carbono y, al mismo tiempo, incrementar la rentabilidad del sector nucleoelectrico”, asevera Anton Moskvín, Vicepresidente de Mercadotecnia y Desarrollo Empresarial de Rusatom Overseas.

# Intelligentes, estables, fiables

## Redes eléctricas inteligentes y energía nucleoelectrica en sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono

Sinead Harvey

La energía nucleoelectrica combinada con las redes eléctricas inteligentes —redes bidireccionales que conectan a los productores con los consumidores utilizando nuevas tecnologías— puede ayudar a los países a hacer la transición a fuentes de electricidad con bajas emisiones de carbono y garantizar suministros energéticos fiables, estables y sostenibles.

Muchos países están diversificando su canasta energética de fuentes de baja emisión de carbono para ayudar a descarbonizar su economía y cumplir sus objetivos climáticos, lo cual ha dado lugar a una transición mundial a fuentes de energía renovables. Sin embargo, por sí solas, estas fuentes no pueden satisfacer la demanda de forma íntegra y fiable.

“Las fuentes de energía renovable con bajas emisiones de carbono son inocuas para el clima, pero no siempre pueden controlarse fácilmente ni satisfacer la demanda energética debido al carácter intermitente de las energías solar y eólica y a la falta de capacidades de almacenamiento de energía en masa. En consecuencia, la red eléctrica a menudo necesita fuentes de energía complementarias”, señala Henri Paillere, Jefe de la Sección de Estudios Económicos y Planificación del OIEA. “Con la contribución de fuentes de energía más diversas a las redes eléctricas, estas han debido volverse más flexibles y adaptables para asegurar un suministro energético fiable y resiliente”.

Se puede generar energía con bajas emisiones de carbono por medios nucleoelectricos las 24 horas, lo cual proporciona la seguridad energética que los países necesitan para adoptar sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono. Al funcionar de manera flexible, las centrales nucleares pueden complementar la generación variable de energía que se obtiene con las energías renovables y, gracias a la inercia de sus grandes turbinas de vapor, estas centrales también pueden ayudar a estabilizar las redes y garantizar un suministro limpio y fiable de energía eléctrica.

Tradicionalmente, las redes eléctricas han dependido de centrales alimentadas por combustibles fósiles, como el carbón y el gas natural, para encenderse y apagarse a fin de satisfacer la demanda energética cuando esta sobrepasa la oferta.

En cambio, las redes eléctricas inteligentes pueden admitir muchas fuentes distintas de energía y cambiar de manera dinámica entre ellas, a diferencia de las redes eléctricas tradicionales, que son menos flexibles. Aunque hace ya tiempo que existen redes inteligentes, los avances tecnológicos las han llevado al siguiente nivel. Las redes inteligentes pueden utilizar tecnología reciente, como la inteligencia artificial y el Internet de las cosas —un sistema de computadoras y dispositivos conectados a través de Internet que pueden compartir datos y actuar en función de estos de forma dinámica—, para recopilar información, aumentar el rendimiento operativo y automatizar los procesos.

Por ejemplo, una red eléctrica inteligente puede utilizar los pronósticos generados por la inteligencia artificial para pronosticar un día nublado y sin viento y cambiar dinámicamente de la producción de origen solar y eólico a alternativas como la energía nucleoelectrica para evitar interrupciones en el suministro. La inteligencia artificial también permite pronosticar dónde puede desatarse una tormenta y cuánto puede durar y enviar señales a la red para que aumente y diversifique la producción en caso de daños en las líneas de transmisión.

Si se rompe una línea de transmisión o hay un corte de energía, los sensores y dispositivos del sistema de Internet de las cosas de la red pueden informar a los operadores de la necesidad de realizar obras de reparación y redirigir la electricidad o recuperarla de otra fuente.

Con las redes eléctricas tradicionales, las repercusiones de una tormenta solo pueden evaluarse tras su paso. Por lo tanto, vivir en una zona alimentada por una línea de transmisión eléctrica rota a menudo suponía quedarse sin electricidad hasta que se reparara la línea. Gracias a su capacidad de encontrar soluciones alternativas para la producción y el suministro de electricidad, las redes inteligentes son más resilientes y pueden reducir los cortes sufridos por los consumidores.

En Électricité de France (EDF), uno de los mayores productores de electricidad a nivel mundial, por ejemplo, algunas de las tecnologías innovadoras de redes inteligentes actualmente en proceso de desarrollo comprenden el uso de la tecnología 5G —la nueva generación de tecnología de Internet móvil— para impulsar el Internet de las cosas y el



desarrollo de redes híbridas más eficientes para las corrientes eléctricas. También se están introduciendo tecnologías de cadenas de bloques, que ofrecen una forma muy segura de vigilar y gestionar las transacciones, para certificar dónde se produce energía limpia y en qué cantidad. EDF emplea un método llamado “creación de gemelos digitales” a fin de generar entornos virtuales para prever las necesidades de mantenimiento de las redes y reducir los gastos de reparación.

“Nuestra labor de investigación y desarrollo sobre las redes inteligentes se centra en diversos desafíos. También estamos teniendo en cuenta las expectativas de la sociedad en cuanto a una infraestructura eléctrica más ecológica y preparándonos para los riesgos, como los cibernéticos y los relacionados con el impacto del cambio climático, además de garantizar que las redes sean resilientes a posibles crisis”, expresa Bernard Salha, Director de Investigación y Desarrollo de EDF. “Por supuesto, todo método nuevo logrado gracias al aumento de la capacidad informática se ensayará en los modelos existentes para aumentar su precisión”.

Evaluar el impacto de estos avances tecnológicos forma parte esencial del proceso, afirma Dian Zahradka, Funcionario Superior de Seguridad Nuclear del OIEA. “Las nuevas tecnologías solo son beneficiosas si son seguras. De conformidad con las normas de seguridad del OIEA, cualquier modificación del diseño, incluido el uso de tecnologías de inteligencia artificial y del Internet de las cosas, se somete a una rigurosa evaluación de la seguridad para valorar el impacto que estos cambios y modernizaciones podrían tener en las centrales nucleares y en su interacción con la red eléctrica. El OIEA organiza reuniones técnicas para examinar las posibles consecuencias e intercambiar experiencias relativas al uso de estas tecnologías en las centrales nucleares”.

### **La inercia de la red y la energía nucleoelectrica**

Las redes eléctricas inteligentes permiten que más fuentes de energía estén conectadas de forma activa y se utilicen de manera dinámica. Sin embargo, ello ha dado pie también a mayores fluctuaciones en la frecuencia eléctrica y, por lo tanto, a una mayor inestabilidad.

Una red eléctrica funciona a una frecuencia específica y está diseñada para mantenerse dentro de un rango determinado con el objeto de garantizar un suministro de energía constante.

Los cambios de frecuencia ocurren constantemente a medida que las personas apagan y encienden sus dispositivos eléctricos. Estos cambios son absorbidos por las partes móviles que generan electricidad en una fuente de energía, como una turbina giratoria en una central nuclear o una central alimentada con combustibles fósiles.

Esta pesada masa giratoria puede moverse con mayor o menor rapidez para ejercer funciones de amortiguación y, de esta manera, ayudar a equilibrar las fluctuaciones en la frecuencia y compensar los cambios rápidos. La manera en que se mueven estas partes y su influencia en la energía de la red se denominan “inercia de la red”.

Sin embargo, fuentes de energía renovables como la solar no tienen partes móviles. Otras energías renovables sí cuentan con esas partes móviles, como las turbinas eólicas, pero estas no están conectadas directamente a la red, sino que funcionan mediante un convertidor de frecuencia, por lo que carecen de la inercia necesaria.

“Sin inercia, la red tiene una capacidad limitada de absorber las fluctuaciones y puede volverse inestable”, explica Shannon Bragg-Sitton, Directora Técnica Nacional de Sistemas Energéticos Integrados en el Laboratorio Nacional de Idaho de los Estados Unidos. “También se vuelve particularmente vulnerable a los grandes cambios, como la desconexión repentina de una fuente de energía, un cambio importante en la carga neta o un suceso grave en la transmisión. Estos cambios podrían provocar sobrecargas o cortes repentinos de electricidad y posibles cortes bruscos ulteriores de la energía eléctrica. La energía nucleoelectrica puede ayudar a hacer frente a este problema y dotar a la red de parte de la estabilidad necesaria”.

El OIEA presta apoyo a los países para evaluar la fiabilidad y la resiliencia de las redes eléctricas, en especial por medio del uso de la energía nucleoelectrica, a través de publicaciones, talleres y reuniones técnicas. El OIEA también conecta a las partes interesadas del sector nuclear y del sistema de redes eléctricas y les permite intercambiar información, presentar buenas prácticas y examinar los desafíos y las oportunidades comunes. Estas actividades ayudan a los países a determinar sus estrategias energéticas para lograr la seguridad y la sostenibilidad del suministro de energía.

# Invertir en la transición a una energía limpia

## Financiación y apoyo económico para la energía nucleoelectrica

Shant Krikorian



Las políticas innovadoras de financiación y de mercado son una forma de que las inversiones en centrales nucleares de nueva construcción se vuelvan más atractivas, lo cual podría ayudar a allanar el camino hacia un futuro basado en la energía limpia.

La energía nucleoelectrica, que no emite gases de efecto invernadero (GEI) durante la explotación, ha recibido amplio reconocimiento en muchos países por su importante papel en la reducción de las emisiones de GEI y la mitigación del cambio climático. Su corriente energética, flexible y continua, también puede complementar los suministros cuando no estén disponibles otras fuentes, como, por ejemplo, energías renovables variables como la eólica o la solar.

A pesar de estos beneficios, uno de los mayores desafíos que supone la adopción de la energía nucleoelectrica reside en los aspectos económicos. Si bien la energía nucleoelectrica generada en las instalaciones actuales sigue siendo económicamente competitiva en muchos mercados, la financiación de una nueva central exige un elevado desembolso de capital inicial y una inversión a largo plazo.

“El mercado energético está cambiando, y se ha vuelto más impredecible en muchos países porque estos están diversificando sus fuentes de energía a fin de descarbonizarse, lo cual ha dado lugar a mayores fluctuaciones en los precios y los suministros de energía”, expresa Wei Huang,

Director de la División de Planificación, Información y Gestión de los Conocimientos del OIEA. “Este mercado, más volátil, contribuye a la incertidumbre planteada por el compromiso con tecnologías de vida larga que exigen un uso intensivo de capital y suponen elevados costos por adelantado, como la energía nucleoelectrica”.

“Los enfoques innovadores en materia de políticas de financiación y de mercado en la industria nuclear pueden ayudar a atenuar la incertidumbre y contrarrestar las fluctuaciones del mercado”, señala Maria G. Korsnick, Presidenta y Directora General del Instituto de Energía Nuclear. Los avances en el ámbito de la tecnología también están ayudando a convertir la energía nucleoelectrica en una opción más eficaz en relación con los costos (véase la página 14).

“Para que la opción nuclear alcance su pleno potencial en un futuro caracterizado por bajas emisiones de carbono, las centrales nucleares deben recibir compensación adecuada por sus cualidades en materia de energía limpia y otros beneficios que no se valoran uniformemente en los diferentes mercados de la electricidad”, afirma la Sra. Korsnick. “Los encargados de formular políticas deben adoptar enfoques que aprovechen el consenso cada vez mayor en el sentido de que la incorporación de la energía nuclear es la forma más eficaz en relación con los costos de emprender una transición rápida a un sistema eléctrico limpio. Ello supone dar prioridad a la conservación de los activos existentes relacionados con la energía nuclear y abrir una vía para la construcción de instalaciones avanzadas de energía nuclear”.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, en 2017 el total de subvenciones directas otorgadas al sector energético a nivel mundial ascendió a por lo menos 634 000 millones de dólares, en gran medida en forma de subvenciones a los combustibles fósiles y a las tecnologías de generación de energía renovable.

### Fomento de las inversiones en el sector nuclear

Los contratos de compra de energía eléctrica (CCEE) se han utilizado durante decenios para diversas tecnologías, pero actualmente tienen cada vez más peso en el sector de la energía nucleoelectrica, ya que constituyen el método más utilizado para reducir la incertidumbre y obtener ingresos a largo plazo en relación con un nuevo proyecto de central nuclear. Estos acuerdos se conciertan entre los ejecutores del proyecto y los compradores de la central nuclear a fin de acordar un precio correspondiente a una cantidad específica de electricidad durante un determinado lapso de tiempo, a menudo largo, que suele cubrir el costo total del proyecto más un margen. Los CCEE también suelen complementarse con otras formas de apoyo aportado por los gobiernos y los proveedores, a lo cual se suman planes innovadores de financiación de la energía

nucleoelectrica, como contratos por diferencias y proyectos de construcción-propiedad-explotación, concebidos para reducir los riesgos y atraer inversiones.

En el proyecto de la central nuclear de Akkuyu en Turquía, por ejemplo, se emplearon CCEE, así como garantías de financiación y de préstamo del gobierno y de los proveedores.

“La central nuclear de Akkuyu combina un CCEE que cubre los costos del proyecto con la financiación por parte del proveedor, Rosatom, la Corporación Estatal de Energía Atómica de Rusia, que construirá la central, será su propietaria y la explotará. Ello brinda a todas las entidades involucradas la estabilidad y las garantías derivadas de saber que el precio de la electricidad y las diversas inversiones son seguras”, señala Anton Dedusenko, Vicepresidente de la Junta de Directores de la central nuclear de Akkuyu. “La seguridad que aporta este CCEE ha abierto el camino a conversaciones con posibles inversores interesados en adquirir una participación en el proyecto de hasta el 49 %. Una inversión tan cuantiosa suele ser atractiva cuando se cuenta con garantías y con certeza sobre los futuros ingresos de la central, y eso es lo que puede proporcionar el CCEE”.

### Tarificación del carbono

Pensando en un futuro basado en la energía limpia, las políticas gubernamentales encaminadas a apoyar la generación de electricidad con bajas emisiones de carbono se han materializado en forma de subvenciones directas, tarifas reguladas de alimentación de energías renovables, cuotas obligatorias y exenciones de impuestos energéticos.

Uno de los métodos que es objeto de amplia aceptación es la tarificación del carbono, cuyo objetivo es reducir las emisiones y fomentar el uso de fuentes de baja emisión de este elemento, lo cual permite también convertir estas fuentes de energía en una opción más competitiva y estable frente al bajo costo de los combustibles fósiles.

La tarificación del carbono, en su forma más sencilla, es un impuesto por tonelada a las emisiones de dióxido de carbono generadas, por ejemplo, por centrales eléctricas y calderas industriales. En el marco de un programa de tarificación del carbono, una fábrica donde se utilizaran combustibles fósiles y se emitieran grandes cantidades de dióxido de carbono pagaría más que una que empleara fuentes de baja emisión de carbono y generara menos emisiones.

“El precio del carbono se fija sobre la base del costo estimado de las emisiones de gases de efecto invernadero, como por ejemplo el costo de los daños sufridos por la salud de las personas y el medio ambiente”, indica Henri Paillere, Jefe de la Sección de Estudios Económicos y

Planificación del OIEA. “El objetivo es desplazar la carga de los daños derivados de las emisiones de dióxido de carbono a la fuente responsable para fomentar el uso de fuentes de baja emisión de carbono a fin de reducir, en última instancia, las emisiones de gases de efecto invernadero”.

En el caso de la energía nucleoelectrica, tarificar el carbono podría dotar a su explotación de mayor competitividad en comparación con los combustibles fósiles, especialmente a largo plazo, debido a los ahorros en concepto de emisiones. Estabilizando el precio, también se reducen algunas de las incertidumbres asociadas con las inversiones en energía nucleoelectrica.

“Las tecnologías de bajas emisiones de carbono, como la energía nuclear, además de la energía hidroeléctrica y las energías renovables variables, exigen que ese precio del carbono siga siendo competitivo frente a los combustibles fósiles, en particular cuando cae el precio de estos”, sostiene Jan Horst Keppler, Asesor Económico Superior de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN de la OCDE). “Sin embargo, a largo plazo, los gobiernos deben convencer a los encargados de elaborar proyectos y a los inversores de su seriedad en cuanto a la adopción de precios estables del carbono o a su aumento”.

Las actividades del OIEA relacionadas con la planificación energética ayudan a los países a desenvolverse en el proceso de analizar las opciones de financiación y de políticas. El OIEA lleva a cabo estudios de los modelos de financiación existentes, organiza reuniones de expertos y publica informes exhaustivos sobre los costos y beneficios de la energía nucleoelectrica sobre la base de proyectos finalizados de manera satisfactoria.

“Garantizar el funcionamiento continuo de las centrales nucleares actuales y acelerar el despliegue de otras nuevas puede resultar difícil en un mercado energético volátil”, expresa el Sr. Paillere. “Es preciso que las instituciones gubernamentales sigan reconociendo el papel fundamental que desempeña la energía nucleoelectrica para el desarrollo sostenible y la generación de energía limpia”.

# Seguridad y concesión de licencias para reactores modulares pequeños

## Un enfoque tecnológicamente neutro

Miklos Gaspar



Sala de control de un simulador de reactor modular pequeño de NuScale Power.

(Fotografía: Energy Northwest)

Si bien los reactores modulares pequeños (SMR) pueden tener un tamaño menor y emplear tecnologías innovadoras que incluyen muchas características de seguridad inherentes, el objetivo último en cuanto a su reglamentación sigue siendo el mismo: velar por la protección de las personas y el medio ambiente y reducir al mínimo el riesgo de accidentes y de emisiones radiactivas.

Los enfoques novedosos en materia de diseño y despliegue de SMR pueden plantear desafíos a los marcos de reglamentación vigentes. En comparación con los reactores ya existentes, los diseños de SMR suelen ser más sencillos y en su concepto de seguridad tienen más peso los sistemas pasivos y las características de seguridad inherentes del reactor, como una potencia y una presión de funcionamiento bajas. Esto incrementa los márgenes de seguridad y, en algunos casos, prácticamente elimina el riesgo de que el núcleo del reactor sufra daños graves y, por lo tanto, la posibilidad de que se produzcan emisiones de radiactividad a gran escala en caso de accidente. En consecuencia, la dependencia respecto de unas medidas de contención y respuesta a emergencias robustas se reduce.

“Por lo general, los SMR dependen menos de los sistemas de seguridad, las medidas operacionales y la intervención humana que los reactores actuales. Por ello, el enfoque habitual en materia de reglamentación, basado en unas disposiciones de seguridad que se complementan entre sí para compensar posibles fallos mecánicos o humanos, puede no resultar adecuado, y habría que estudiar nuevas ideas”, señala Greg Rzentkowski, Director de la División de Seguridad de las Instalaciones Nucleares, del OIEA. No obstante, los conceptos principales sobre los que se sustenta el enfoque de seguridad actual —como, por ejemplo, la defensa en profundidad, que garantiza la prevención y la mitigación de accidentes a varios niveles técnicos y de procedimiento— son pertinentes para los SMR si se aplican utilizando la información relativa a los riesgos y al funcionamiento de los reactores, añade el Sr. Rzentkowski.

A fin de demostrar que el diseño de una central nuclear de cualquier tipo es seguro, es necesario llevar a cabo un examen exhaustivo de la seguridad de todos los estados de la central (funcionamiento normal, incidencias operacionales previstas y condiciones de accidente), que permitirá determinar la

capacidad del diseño para soportar sucesos internos y externos y definir los criterios de rendimiento para las características de seguridad, incluida la planificación para casos de emergencia.

“La prueba del concepto de los SMR requiere demostrar la eficacia de las funciones principales de seguridad —control del reactor, refrigeración del núcleo y confinamiento de la reactividad— basándose en la optimización de las estrategias de defensa en profundidad a fin de reducir al mínimo el riesgo de accidentes y, en caso de que se produjera uno, eliminar prácticamente sus consecuencias”, afirma el Sr. Rzentkowski. En vista de los nuevos conceptos relacionados con el diseño y la seguridad, debería prestarse una atención específica a validar la justificación de la seguridad, así como las interrelaciones entre unidades, las propiedades de los materiales y factores humanos. Además, por bajo que sea el riesgo de accidentes, es fundamental dotarse de disposiciones flexibles en relación con el confinamiento y la respuesta a emergencias, añade el Sr. Rzentkowski.

### Un marco tecnológicamente neutro

Dada la diversidad que, desde un punto de vista tecnológico, presentan los conceptos y los diseños de tecnologías innovadoras, incluidos los SMR, el OIEA está trabajando en la definición de un marco tecnológicamente neutro para la seguridad que ayude a armonizar los enfoques internacionales sobre la base de las normas de seguridad del OIEA vigentes.

Este marco tecnológicamente neutro incluye una parte general (la jerarquía de los objetivos para la sociedad y en materia de salud, los objetivos en materia de prevención de riesgos y los principios y requisitos de seguridad de alto nivel) que los marcos nacionales pueden desarrollar para abordar elementos de reglamentación o técnicos, en función de la tecnología específica utilizada. Este enfoque ofrece flexibilidad y permite combinar de manera adecuada técnicas innovadoras y otras que ya se han probado, lo que es fundamental para optimizar las medidas protectoras y de mitigación relacionadas con los objetivos de seguridad generales y los objetivos específicos en materia de prevención de riesgos, añade el Sr. Rzentkowski.

Algunos países ya están trabajando activamente en esta esfera. El Canadá, por ejemplo, es uno de los países, junto con la Argentina, China, los Estados Unidos y Rusia, que lleva a cabo exámenes reglamentarios de los SMR.

“El marco regulador tecnológicamente neutro de la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN), basado en gran medida en las normas de seguridad del OIEA, permite aunar novedad e innovación en el diseño, la construcción, la explotación y la clausura de los reactores, sin poner en peligro la seguridad”, declara Hugh Robertson, Director General de la CCSN. “En los casos en los que hay dudas acerca de los márgenes de seguridad del diseño y la experiencia operacional es limitada, pueden ser necesarios controles operacionales adicionales. En esos casos, las medidas de protección serán proporcionales al riesgo”.

La colaboración entre los órganos reguladores y la armonización de los requisitos reglamentarios puede beneficiar a todas las partes implicadas, añade el Sr. Robertson. “Esto hace que, en última instancia, el proceso de concesión de licencias sea más eficiente y eficaz. De hecho, que varias personas examinen los problemas de seguridad comunes puede propiciar un aumento del nivel de seguridad. La misma información científica y sobre reglamentación puede también utilizarse de manera que no interfiera con la soberanía en materia de reglamentación, al tiempo que seguimos analizando nuevas oportunidades de armonización”.

### Estudios de casos para demostrar la seguridad

Pese a que las normas de seguridad del OIEA, que sirven como referencia a escala mundial para proteger a las personas y el medio ambiente de los efectos nocivos de la radiación ionizante, suelen ser neutrales desde el punto de vista tecnológico y son aplicables a los SMR, el OIEA seguirá prestando apoyo a los reguladores nacionales, para lo que desarrollará orientaciones específicas que permitan aplicar dichas normas. “Los estudios de casos para demostrar de qué manera los requisitos de diseño de las centrales nucleares pueden usarse en la concesión de licencias para las dos tecnologías de SMR más comunes, los reactores refrigerados por agua y los reactores de alta temperatura refrigerados por gas, ya han finalizado”, declara el Sr. Rzentkowski.

Paralelamente, el Foro de Reguladores de SMR está trabajando para poner en común conocimientos y experiencia en materia de reglamentación y determinar buenas prácticas. El Foro, cuyo anfitrión es el OIEA, está formado por un grupo internacional de trabajo sobre los desafíos que plantea la regulación de los diseños novedosos de SMR, a fin de elaborar nuevas recomendaciones sobre seguridad para estos reactores. Estas recomendaciones ya pueden consultarse en el sitio web del OIEA, después de la reunión celebrada sobre la elaboración de normas nacionales específicas para los SMR. La labor del Foro se centra en la naturaleza multimodular de los SMR y en los aspectos de la interdependencia entre los módulos que guardan relación con la seguridad a fin de verificar que, si algo fallara en un módulo, los efectos de ese fallo en el resto de módulos serían mínimos.

“Si bien es evidente que la seguridad siempre será la principal prioridad, el enfoque en materia de reglamentación de los SMR requiere dejar de pensar en los reactores de manera individual para llevar a cabo una evaluación de la seguridad a escala global que examine la solidez del diseño, la exhaustividad de la justificación de la seguridad y la idoneidad de los procesos que se han llevado a cabo para garantizar la seguridad durante toda la vida del reactor y evitar que, una vez terminada la construcción de los reactores, tengamos que preocuparnos de resolver los problemas de seguridad”, reconoce el Sr. Rzentkowski.

# Evolución orientada al futuro

## Las salvaguardias y la energía nucleoelectrica

### Adem Mutluer

A medida que prosigue la evolución de la tecnología nucleoelectrica y que aumenta el número de instalaciones nucleares y crece el volumen de material nuclear en todo el mundo, la tecnología en materia de salvaguardias debe mantener el ritmo para seguir siendo eficaz. Las salvaguardias son un conjunto de medidas técnicas dirigidas a verificar que el material y la tecnología nucleares solo se utilicen con fines pacíficos y que no se desvíen a la fabricación de bombas nucleares.

“La inteligencia artificial, la fabricación aditiva y la tecnología de registros distribuidos se encuentran entre los cambios venideros que puede que afecten a la aplicación de salvaguardias internacionales”, dice Chad Haddal, Oficial del OIEA de coordinación de la divulgación en materia de salvaguardias. “Con el desarrollo de medios avanzados de producción de energía nucleoelectrica, también es obligado seguir adaptando las salvaguardias para velar por su verificación constante y eficaz”.

Los avances en el ámbito de la tecnología están contribuyendo a elevar la sostenibilidad, la eficacia en relación con los costos y la seguridad física y tecnológica de la producción de energía nucleoelectrica. Las fuentes fiables de baja emisión de carbono, como la energía nucleoelectrica, han ido cobrando cada vez más importancia en muchos países que buscan maneras de descarbonizar la producción de energía y crear un futuro basado en la energía limpia.

“Mientras prosigue el desarrollo de la tecnología nucleoelectrica, es obligado que los planes den cabida a las salvaguardias”, afirma Menekse Basturk Tatlisu, Analista de Salvaguardias en el OIEA. “Los acuerdos de salvaguardias entre Estados exigen que el OIEA pueda verificar todo el material nuclear de los países en cuestión. En atención a esta

obligación, los Estados deben proporcionar información sobre el diseño de todas las instalaciones nucleares a efectos de que el OIEA pueda verificar el uso que se hace en ellas de material nuclear y su cuantía”.

### Tecnología nueva y emergente

Los expertos en salvaguardias del OIEA siguen de cerca las tecnologías nuevas y emergentes para mantenerse al corriente de las novedades y de la posible influencia de estas en su labor. Parte de este esfuerzo se plasma en Talleres sobre Tecnologías Emergentes organizados por el Departamento de Salvaguardias del OIEA en los que expertos internacionales examinan y perfilan estas tecnologías junto con personal del Organismo.

“Los perfiles presentados por expertos de nuevas tecnologías que pueden tener repercusiones en la generación de energía nucleoelectrica y energía nuclear en general nos ayudan a comprender la manera en que ello podría afectar a la misión en materia de salvaguardias y al futuro entorno en que asumiremos esa misión”, dice el Sr. Haddal. “Prestamos igual de atención a las ventajas derivadas de las nuevas tecnologías y a las dificultades que plantean. Debemos tener conocimiento de las novedades tecnológicas pertinentes que tienen lugar fuera de nuestro entorno y ser adaptables a ellas, para lo cual adoptamos un enfoque proactivo y progresista”.

### Aplicación y perfeccionamiento de la tecnología

Uno de los ejemplos más recientes de una tecnología nueva desarrollada por el OIEA es un conjunto de algoritmos basados en el aprendizaje conocidos como redes neurales. Estas redes informatizadas se basan, a grandes rasgos, en la memoria asociativa del cerebro humano y están diseñadas para aprender, analizar e identificar de forma progresiva pautas a fin de ayudar a comprender los datos.

### Inspectores de salvaguardias instalando una cámara de vigilancia.

(Fotografía: D. Calma/OIEA)



Con respecto a las salvaguardias, los analistas examinan grandes cantidades de datos captados por videovigilancia. En 2019 el OIEA mantuvo 1425 cámaras de vigilancia en instalaciones nucleares de todo el mundo. Las cámaras están en funcionamiento ininterrumpidamente. Aportan continuidad al conocimiento del material nuclear y permiten a los inspectores de salvaguardias asegurarse de que no existe acceso no detectado al material ni actividades no declaradas dentro de la instalación. Como algunas instalaciones utilizan múltiples cámaras de vigilancia, la cantidad de datos generados puede ser enorme.

El uso de redes neurales que podrían desarrollarse mediante inteligencia artificial y aprendizaje automático podría ayudar a los inspectores de salvaguardias a detectar en una instalación movimientos de material nuclear y otras actividades relacionadas con las salvaguardias. Mediante estas tecnologías también podrían determinarse los indicadores más pertinentes para reconocer y vigilar objetos y detectar objetos y comportamientos imprevistos. Ello permitiría a los analistas hacer un uso más eficaz y eficiente de su tiempo al examinar los datos de vigilancia.

### Salvaguardias incorporadas

En vista de que la tecnología abre nuevas puertas al uso efectivo de la energía nucleoelectrica, la experiencia ha demostrado que lo mejor es diseñar desde el principio nuevas instalaciones teniendo en cuenta las salvaguardias.

“La incorporación de consideraciones relativas a las salvaguardias desde las fases iniciales beneficia por igual a un país, a los explotadores y a las salvaguardias del OIEA”, dice la Sra. Basturk Tatlisu. “La inclusión de consideraciones relativas a las salvaguardias en el diseño inicial de las nuevas instalaciones y procesos

de energía nucleoelectrica puede facilitar el proceso de verificación de las salvaguardias para los operadores, así como para los inspectores de salvaguardias del OIEA”.

Por ejemplo, cuando se diseñan el almacenamiento del combustible no irradiado, el núcleo del reactor y el almacenamiento del combustible gastado en una nueva instalación nuclear teniendo en cuenta las salvaguardias, la aplicación de salvaguardias puede resultar más eficiente y eficaz en relación con los costos a la vez que se reducen al mínimo los efectos de las actividades de las instalaciones nucleares.

Los países pueden consultar la serie de documentos del OIEA sobre incorporación de las salvaguardias en el diseño para obtener orientación y asesoramiento en relación con los factores en materia de salvaguardias que deben tener en cuenta, por ejemplo al diseñar un nuevo reactor nuclear, modernizar o construir una instalación nuclear y establecer una instalación de gestión del combustible gastado a largo plazo. La serie ofrece asesoramiento a las autoridades, los diseñadores, los proveedores de equipo y los posibles compradores para que puedan adoptar decisiones fundamentadas, al tiempo que consolida los factores económicos y operacionales y relativos a la seguridad tecnológica y física relacionados con el diseño de una instalación nuclear.

“La serie sobre la incorporación de las salvaguardias en el diseño va dirigida a ayudar a los países a llegar a un equilibrio óptimo entre los costos, los requisitos jurídicos y la eficiencia operacional”, afirma la Sra. Basturk Tatlisu. “En el desarrollo de todos los aspectos del ciclo del combustible nuclear, desde la planificación inicial hasta la clausura, debe tenerse en cuenta la incorporación de las salvaguardias en el diseño”.



# Profundización en la descarbonización mediante la energía nuclear

Kirsty Gogan y Eric Ingersoll



Kirsty Gogan es cofundadora y Directora Ejecutiva de Energy for Humanity, ONG ambiental centrada en la descarbonización profunda y el acceso a la energía a gran escala.



Eric Ingersoll es Oficial Jefe de Tecnología en Energy for Humanity y asesor estratégico y emprendedor provisto de abundante experiencia de comercialización de nuevas tecnologías energéticas.

El mundo va muy desencaminado en cuanto al cumplimiento de los objetivos climáticos del Acuerdo de París, consistentes en limitar el aumento de la temperatura mundial a un máximo de 1,5 °C o 2 °C para 2050. Según las actuales proyecciones, los combustibles fósiles constituirán para 2050 la mayor parte del uso energético mundial.

De no cumplir la meta de 1,5 °C, ello supondría aceptar impactos climáticos, como el desplazamiento de millones de personas por el aumento del nivel del mar y la exposición de más millones a olas de calor extremo, así como impactos profundos relacionados con la biodiversidad, entre ellos pérdidas de especies, la eliminación del hielo marino en el océano Ártico y la pérdida de prácticamente todos los arrecifes coralinos.

De no cumplir la meta de 2 °C, la mitad de la población mundial podría quedar expuesta al “calor mortífero” veraniego, los mantos de hielo del Antártico podrían desvanecerse, las sequías podrían aumentar de forma masiva y el desierto del Sahara podría empezar a expandirse por Europa Meridional. Los suministros mundiales de alimentos podrían correr peligro, lo cual desencadenaría una migración humana en masa y elevaría el riesgo de desmoronamiento de la civilización.

Las actuales vías de energía, incluso las que comportan una amplia expansión de la generación de energías renovables, arrastran al mundo hacia resultados climáticos catastróficos, siendo alto el riesgo de que la temperatura aumente 4 °C. Ello podría suponer que extensas zonas del planeta pasarían a ser inhabitables.

La campaña nuclear flexible ministerial para la energía limpia que hemos cofundado explora el papel ampliado que puede corresponder a la energía nuclear en la reducción del riesgo en la transición energética. A continuación describimos dos oportunidades de profundizar en la descarbonización mediante la energía nuclear.

La primera consiste en ampliar el papel de la energía nuclear en la producción de electricidad mediante una combinación de reactores avanzados con el almacenamiento de energía térmica. Con ello se pretende complementar las energías renovables en las futuras redes energéticas.

La segunda consiste en hacer frente a la utilización de petróleo y gas, que representa actualmente tres cuartos del consumo de energía, suministrando hidrógeno de bajo costo producido a gran escala mediante energía nucleoelectrica.

Para alcanzar el costo, la escala y la tasa de despliegue de la energía nuclear que se necesitan, es preciso un paradigma nuevo. La industria nuclear debe hacer gala de compromiso y creatividad combinados con innovaciones técnicas y empresariales, tal como aprendieron a hacer las industrias de las energías renovables.

¿Cómo podría un modelo de fabricación de despliegue rápido y con atractivo comercial que sea de bajo costo y gran volumen permitir que las tecnologías nucleares contribuyan al logro para 2050 de los objetivos de cero emisiones y energía sostenible para todos?

## La flexibilidad nuclear en las futuras redes de electricidad

En nuestro reciente estudio de las necesidades de costos y rendimiento en relación con las centrales nucleares avanzadas, llevado a cabo en el marco del programa MEITNER de ARPA-E en los Estados Unidos, se definen los requisitos de mercado para los desarrolladores de reactores avanzados que se propongan diseñar productos útiles a un costo competitivo con fines de comercialización a principios del decenio de 2030.



En nuestro estudio se indican los precios y las características en cuanto a rendimiento que se exigirán a los propietarios de centrales nucleares y a los correspondientes inversores, así como a la sociedad en su conjunto, para obtener futuros sistemas de electricidad asequibles, fiables, resilientes, flexibles y, sobre todo, limpios. De nuestras constataciones se desprende que habrá grandes mercados de reactores avanzados cuyo costo será inferior a 3000 dólares/kW. La combinación de las centrales nucleares con el almacenamiento de energía térmica permite recurrir a la energía nuclear como recurso para puntas de demanda, lo cual crea valioso almacenamiento adicional de energía, y añade valor al sistema energético. Para los operadores de la red, los creadores de modelos de sistemas energéticos y los encargados de formular políticas ello demuestra el valor de las tecnologías nucleares flexibles, no solo a efectos de reducir las emisiones, sino también de reducir los costos totales en el sistema energético en su conjunto.

### Combustibles sintéticos posibles gracias al hidrógeno

Para alcanzar la escala y el ritmo de reducción de las emisiones que se necesitan, junto con el aumento del acceso a la energía y el crecimiento económico de ámbito mundial, los sustitutos de combustibles sin emisión de carbono o neutros en carbono deben alcanzar la paridad con los combustibles fósiles en cuanto a precio y rendimiento.

La producción nuclear de hidrógeno sin emisiones puede presentar costos competitivos en combinación con otros métodos de producción sin emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y encierra potencial de presentar costos competitivos en combinación con el reformado de metano con vapor del gas natural de bajo costo (Allen y otros, 1986; BloombergNEF 2020; Boardman y otros, 2019; Gogan e Ingersoll 2018; Consejo del Hidrógeno 2020; AIE 2019b; NREL 2019b; M. Ruth y otros, 2017; Yan 2017). Incluso las centrales nucleares convencionales de la Unión Europea y los Estados Unidos que fueron primeras en su género pueden producir hidrógeno limpio a costos equiparables a los de los actuales recursos eólicos y solares si los factores de capacidad son buenos.

La producción a gran escala de hidrógeno limpio de bajo costo podría permitir la descarbonización de la aviación, la navegación, la producción de cemento y la industria, si es competitiva frente al petróleo barato. Estimamos este objetivo de precio en 0,90 dólares/kg.

Las actuales proyecciones para el hidrógeno generado por energías renovables se estiman en tan solo 2 dólares para 2030, cifra que sería aún más baja para 2050. Las reducciones de los precios se ven limitadas por factores de capacidad bajos, aunque prevemos que sigan disminuyendo los costos de capital en concepto de energías renovables.

Las centrales nucleares podrían producir hoy hidrógeno limpio a menos de 2 dólares/kg, y una nueva generación de reactores modulares avanzados podría fijar ese precio en 0,90 dólares/kg para 2030.

Para propiciar un aumento en masa de la producción de hidrógeno limpio, la industria nuclear deberá transformar los modelos de ejecución y despliegue de proyectos para ampliar la producción de calor, combustibles y energía limpios y entregar estos productos. Para ello será preciso dirigir la atención a la reducción de costos, las mejoras en el rendimiento y las tasas de despliegue con la misma intensidad que ha permitido a las energías renovables empezar a transformar el sistema energético mundial.

Una reducción de los costos pronunciada y a corto plazo es viable si se pasa de los proyectos de construcción tradicionales a entornos de fabricación de productividad alta, como astilleros o “gigafábricas de hidrógeno”, que son refinerías de última generación ubicadas en terrenos contaminados, como grandes refinerías costeras de petróleo y gas.

El paso de la construcción tradicional a la fabricación de alta productividad de reactores avanzados reducirá espectacularmente el costo de la producción de hidrógeno limpio y combustibles sintéticos. Los grandes astilleros disponen ya de amplia capacidad de fabricación a efectos de implantar instalaciones de producción de hidrógeno diseñadas con dicho fin.

Las gigafábricas y las centrales nucleares frente a la costa fabricadas en astilleros podrían volver a encaminar al mundo hacia el cumplimiento de los objetivos de 1,5/2 °C del Acuerdo de París. Esta labor de descarbonización en masa puede llevarse a cabo ocupando muy poca tierra, lo cual permitiría reservar grandes extensiones de tierra con fines de restauración de la fauna y la flora silvestres y regeneración de los ecosistemas naturales, a diferencia de la “expansión energética” vinculada con los complejos industriales del tamaño de un país característicos de las energías renovables.

Empleando estos modelos de producción, la transición en tres decenios del actual consumo diario de 100 millones de barriles a un flujo equivalente de combustibles sustitutos limpios sería posible a un costo muy inferior: en lugar de los 25 billones de dólares necesarios para mantener los flujos de petróleo hasta 2050, los combustibles sustitutos procedentes de energía limpia costarían 17 billones de dólares. Ello contrasta aún más con los 70 billones de dólares correspondientes a una estrategia basada únicamente en energías renovables.

Mediante estos modelos de producción transformados, la energía nuclear puede descarbonizar la economía a un costo inferior al necesario para mantener los combustibles fósiles. Sin embargo, esta transición no comenzará hasta que los gobiernos y otros agentes adopten medidas urgentes para reducir los costos y acelerar la innovación y el despliegue. La energía nuclear debe incorporarse plenamente en la labor mundial de descarbonización.

## Racionalización del almacenamiento

### El OIEA imparte en África capacitación en la esfera de la gestión de los desechos radiactivos



**Alumnos observando a un experto del OIEA que retira una fuente en desuso (desplegada antes en un contexto industrial) durante el ejercicio práctico.**

(Fotografía: O. Yusuf/OIEA)

La idoneidad del procesamiento, acondicionamiento y almacenamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso (DSRS) es esencial para garantizar la seguridad tecnológica y física de las personas y el medio ambiente. Sin embargo, estas actividades pueden plantear dificultades, especialmente en los países que todavía carecen de conocimientos prácticos internos en este ámbito. En consecuencia, el OIEA ha prestado apoyo a la elaboración de un enfoque de gestión de las DSRS que es más sencillo y más eficaz en relación con los costos para los países con relativamente pocas DSRS. Un curso de capacitación impartido en 2020 por el OIEA en Kampala (Uganda) empleó por primera vez este nuevo enfoque.

El enfoque comporta una instalación que proporciona todos los elementos necesarios para el procesamiento, el acondicionamiento y el almacenamiento de fuentes emisoras de radiación neutrónica y gamma del tipo que se utiliza normalmente en la industria y la medicina. La instalación, basada en el denominado “concepto de dos contenedores ISO”, consta de dos contenedores de transporte estándar situados uno junto al otro y provistos de infraestructura adecuada de ventilación, control de la contaminación, seguridad

tecnológica y seguridad física. Un contenedor sirve de instalación de procesamiento y acondicionamiento, mientras que el otro se utiliza para la recepción y el almacenamiento provisional de las DSRS de actividad baja y, posteriormente, de las fuentes acondicionadas.

La instalación y sus procedimientos han sido objeto de un examen internacional por homólogos. Un grupo de expertos internacionales en gestión de desechos radiactivos procedentes de Alemania, los Estados Unidos, Ghana y Marruecos se reunió para observar el funcionamiento de la instalación de dos contenedores ISO, así como el curso de capacitación impartido por el OIEA. Los expertos también examinaron la instalación y los procedimientos técnicos de gestión de los desechos, desde la recepción inicial hasta el almacenamiento final, a fin de evaluar el enfoque a la luz de todas las normas y mejores prácticas internacionales en la materia. Esta labor, que recibe apoyo financiero de la Unión Europea, forma parte de una iniciativa más amplia del OIEA emprendida en el marco del Acuerdo de Cooperación Regional en África para la Investigación, el Desarrollo y la Capacitación en materia de Ciencias y Tecnología Nucleares (AFRA), que va dirigida a ayudar

a los países africanos a fortalecer su infraestructura jurídica y de reglamentación en materia de seguridad nuclear tecnológica y física. El órgano regulador nacional de cada país deberá conceder la licencia de uso de la instalación con fuentes radiactivas en activo. En Uganda se había procedido de ese modo antes del curso de capacitación. “Este enfoque se aplicó conforme a las normas de seguridad del OIEA”, afirma Deogratias Sekyanzi, Director General del Consejo de Energía Atómica de Uganda, que es el órgano regulador del país.

Algunos países como el Camerún cuentan con planes avanzados para utilizar contenedores de transporte con fines de almacenamiento de DSRS, pero en otros países todavía no se ha demostrado la seguridad tecnológica de este método. Dentro de un nuevo proyecto de cooperación técnica puesto en marcha en 2020 el OIEA se dedica a aumentar las capacidades de las organizaciones nacionales a efectos de demostrar la seguridad tecnológica del almacenamiento, explica David Bennett, especialista del Organismo en seguridad de los desechos.

#### El enfoque del contenedor y la cápsula

Una vez construida la instalación, lo siguiente es recuperar las fuentes radiactivas colocadas en sus dispositivos de conformidad con los requisitos y la orientación expuestos en el Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas y las normas de seguridad del OIEA. El enfoque propuesto tiene como punto de partida procedimientos técnicos que debe seguir el personal local para recuperar las fuentes en desuso y acondicionarlas en una forma apta para el almacenamiento. Los procedimientos comportan el uso de una cápsula especial hecha de acero inoxidable en la que se sellan las fuentes en desuso. El diseño de esta cápsula permite un sellado adecuado sin hacer uso de equipo especializado, con lo cual la manipulación resulta más sencilla en cualquier país. Una vez sellada, la cápsula que contiene las fuentes se coloca dentro de un escudo de plomo que, a su vez, se coloca en un barril

revestido de hormigón que sirve de bulto con fines de almacenamiento y transporte de las DSRS.

“Una nueva instalación del tipo que ha sido objeto de demostración en Uganda puede construirse en una superficie inferior a 1000 metros cuadrados y a un costo asequible”, afirma Mohamed Al-Mughrabi, experto superior del OIEA.

### Capacitación de los gestores de desechos radiactivos de África

En el marco de su labor en curso de apoyo al control de las DSRS en

todo el mundo, el OIEA organiza una serie de cursos de capacitación práctica impartidos por conducto del programa de cooperación técnica del OIEA que incluyen la construcción, la concesión de licencias y la utilización en relación con las instalaciones de dos contenedores ISO. Está previsto impartir estos cursos de capacitación en toda África, especialmente en países donde el procesamiento y el acondicionamiento de desechos y las instalaciones para su almacenamiento son todavía inexistentes.

Tras las demostraciones del enfoque de dos contenedores ISO en Uganda, así como en el Camerún, el Senegal y Zimbabwe, y partiendo de las conclusiones de un examen técnico internacional por homólogos, existen planes de introducción del concepto en más países, entre ellos el Camerún, Etiopía, Madagascar y Nigeria.

El OIEA ejecutó el proyecto RAF9062, titulado “Fortalecimiento de la gestión de desechos radiactivos (AFRA)”, que estuvo cofinanciado por la Comisión Europea, España y los Estados Unidos.

— Omar Yūsuf

## Hortalizas más sabrosas y nutritivas Bulgaria mejora la calidad de los alimentos con apoyo del OIEA



**Nasya Tomlekova, profesora del MCVRI, e Iliya Valchanov, agricultor que cultiva las variedades desarrolladas recientemente.** (Fotografía: MCVRI)

Bulgaria, uno de los países con mayor biodiversidad de Europa, es desde hace mucho tiempo un importante exportador de diversos productos alimenticios. Debido al gradual aumento de las temperaturas durante los últimos decenios, los agricultores han presenciado la disminución del rendimiento y la calidad de cultivos destacados. A fin de adaptarse a un entorno cambiante y seguir aportando hortalizas saludables y sostenibles, en la actualidad se están empleando técnicas nucleares.

“En Bulgaria se nos conoce por cultivos de calidad derivados de tradiciones arraigadas de producción

hortícola en todo el país”, afirma Nasya Tomlekova, Jefa del Laboratorio de Biología Molecular del Instituto de Investigaciones sobre Cultivos de Hortalizas de Maritsa (MVCRI), que está ubicado en Plovdiv, la segunda ciudad más grande del país. “Hoy en día encontramos problemas más complejos relacionados con la baja producción y la calidad de las variedades locales. Tenemos que avanzar en este ámbito y promover estos productos, lo cual es posible mediante técnicas nucleares”.

Los actuales programas de fitomejoramiento, respaldados por el OIEA en colaboración con la

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), están centrados en el desarrollo de nuevas variedades de pimiento, tomate y patata.

Para 2020 se facilitarán a los agricultores tres variedades de pimiento en el transcurso de los tres años siguientes. Una de ellas, Zlatna shipka, difundida en 2020, tiene un rendimiento 7 % superior al de las variedades tradicionales. En 2021 se distribuirá una variedad de pimiento Desislava caracterizada por un rendimiento superior y mayores concentraciones de betacaroteno en cantidades idénticas a las presentes en una zanahoria. Esto

es importante porque un consumo elevado de betacaroteno, que el cuerpo convierte en vitamina A, es fundamental para la salud de la piel y los ojos, así como para la fortaleza del sistema inmunitario. Una variedad de pimiento Toniko que se difundirá en 2022 también tendrá mayores concentraciones de betacaroteno.

“Como todo agricultor, he dedicado muchos cuidados y mucho trabajo a obtener una cosecha saludable y de alta calidad”, expresa Yancho Valchev, uno de los agricultores participantes en los ensayos piloto del programa de fitomejoramiento. “Nos enfrentamos a numerosas dificultades —el cambio climático, enfermedades de plantas, insectos y plagas— pero gracias a estos programas hemos logrado registrar mayores rendimientos y una mejor calidad de nuestros cultivos”.

“Como joven cercano a la treintena, me interesan los alimentos y los hábitos saludables y, como agricultor, puedo ofrecerlos mediante las nuevas variedades”, señala Iliya Valchanov, otro agricultor que participa en el programa. “En este momento, estos son los productos más valorados en los mercados locales, especialmente por los jóvenes, que comparten el interés en una alimentación saludable”.

Solo se trata del esfuerzo más reciente del OIEA y la FAO por respaldar la

agricultura en Bulgaria. En los últimos 50 años, los especialistas búlgaros han desarrollado 76 variedades de cultivos tras participar en cursos de capacitación e investigaciones del OIEA relativos al uso de técnicas nucleares para la producción sostenible de alimentos y la seguridad alimentaria (véase el recuadro Base científica).

“La fructífera colaboración entre el OIEA, la FAO y el MVCRI proseguirá con el desarrollo de variedades mejoradas de pimiento, tomate y patata que tengan un rendimiento elevado, mayor calidad nutricional y la capacidad de adaptarse al cambio climático, lo cual permitirá fortalecer la seguridad alimentaria en todo el país”, indica Fatma Sarsu, fitotécnica y genetista de la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura.

## BASE CIENTÍFICA

### ¿Qué es la mejora por inducción de mutaciones?

La mejora por inducción de mutaciones funciona mediante tecnologías nucleares, como rayos X o rayos  $\gamma$ , para inducir cambios en las plantas con fines de mejora de los cultivos. Las semillas o las células de una planta se exponen a la radiación, y los científicos recuperan estas plántulas o semillas nuevas que han experimentado mutaciones y las

colocan en un medio estéril para que crezcan. Mientras las plantas crecen, se vigilan y seleccionan en función de características como el crecimiento, el color, el valor nutricional y la tolerancia al calor. Estas selecciones se siguen vigilando durante varias generaciones, tras lo cual se desarrollan nuevas cepas y nuevas variedades de plantas.

Para acelerar el proceso natural de evolución se utilizan técnicas nucleares, de lo cual surgen variedades de cultivos con características mejoradas.

En la actualidad hay 18 instalaciones de irradiación y en Bulgaria que permiten al país seguir ocupándose de proporcionar alimentos saludables destinados al consumo interno y mantener exportaciones sólidas. Las cepas y variedades mutantes que se han desarrollado en instalaciones de irradiación nacionales y muestran las características deseadas se almacenan en la genoteca nacional, donde se alojan 60 000 muestras de semillas, o en instituciones de investigación de todo el país para su uso posterior. Gracias al programa de cooperación técnica del OIEA y a proyectos coordinados de investigación ejecutados en Bulgaria durante los últimos 50 años, se han difundido 76 variedades de cultivos que se encuentran registradas en la Base de Datos FAO/OIEA sobre Variedades Mutantes.

— Carley Willis

## Con el apoyo del OIEA, China inaugura la mayor instalación del mundo para el tratamiento de aguas residuales mediante haces de electrones

La mayor instalación del mundo para el tratamiento de aguas residuales mediante haces de electrones, que tiene capacidad para tratar 30 millones de litros de aguas residuales industriales al día, se inauguró en China en junio de 2020. Gracias a la construcción mediante tecnología transferida por el OIEA desde 2010, el proceso de tratamiento permitirá ahorrar anualmente 4500 millones de litros de agua dulce, cantidad suficiente para saciar la sed de 100 000 personas al año.

La planta, que funciona en el sur de China en Guanhua Knitting Factory, el mayor importador mundial de hilado peinado, emplea tecnología de haces de electrones para tratar agua contaminada con residuos de colorantes industriales cuyas moléculas, largas y complejas,

no pueden descomponerse utilizando bacterias o productos químicos, pero sí mediante tecnología de haces de electrones. De ese modo, el agua tratada puede reutilizarse.

En la industria textil de China, principal productor mundial del sector, tradicionalmente se han empleado productos químicos para tratar las aguas residuales. Sin embargo, dado el fortalecimiento de las políticas de protección ambiental, la industria está recurriendo a la tecnología de haces de electrones, que ofrece un método de tratamiento de aguas residuales muy eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

“Normalmente, esas aguas residuales se tratarían mediante procesos químicos que generan desechos secundarios”,

indica Bum Soo Han, radioquímico del OIEA. “El tratamiento de aguas residuales por haces de electrones es un método ecológico y eficaz en relación con los costos, ya que permite ahorrar tiempo de tratamiento y los costos de los productos químicos sin generar desechos secundarios”.

Todo comenzó en 2012 como proyecto de cooperación técnica del OIEA a través del cual científicos chinos elaboraron un programa para tratar aguas residuales con haces de electrones. El apoyo del OIEA incluyó becas en instalaciones existentes en otros países, un curso nacional de capacitación y asesoramiento de expertos visitantes que brindaron orientación sobre el desarrollo del proyecto.



**Siete aceleradores de electrones mediante los cuales se tratan aguas residuales de los procesos de impresión y teñido en Guanhua Knitting Factory.** (Fotografía: Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías, Universidad de Tsinghua)

“En 2013 estuve becado en Hungría con apoyo del OIEA”, expresa Shijun He, Profesor en el Instituto de Tecnología de la Energía Nuclear y de las Nuevas Energías (INET) de la Universidad de Tsinghua. “El trabajo en un laboratorio internacional y la participación en cursos de capacitación se reflejan directamente en la labor que hoy llevamos a cabo”.

En 2017 se construyó una instalación piloto en Jinhua, ciudad situada 300 kilómetros al sudoeste de Shanghái, que tiene capacidad para tratar al día 1,5 millones de litros de aguas residuales provenientes de una fábrica textil cercana. Dos años después de que se pusiera en marcha este proyecto de demostración, empezó a construirse en Guanhua Knitting Factory una planta depuradora comercial de aguas residuales. La construcción estuvo a cargo de CGN Nuclear Technology Development Company (CGNNT), sucursal de China General Nuclear Power Corporation (CGN). En la nueva planta de aguas residuales se tratan más de 30 millones de litros al día mediante el funcionamiento de siete aceleradores de electrones. “Más del 70 % de las aguas residuales sometidas a esta operación pueden reutilizarse en la fábrica, frente a la tasa previa de reutilización del 50 %.

Ello supone que se necesita extraer directamente del río cercano menos agua para el funcionamiento de la fábrica, con lo que cada año se ahorran 4500 millones de litros de agua”, señala Dongming Hu, Gestor General de CGNNT.

El éxito de este proyecto ha sido objeto de amplia difusión entre otras industrias de China con miras a aplicar la tecnología para tratar cantidades cada vez mayores de aguas residuales derivadas del crecimiento demográfico y el desarrollo industrial y agrícola. “En China se vierte una gran cantidad de aguas residuales que son difíciles de tratar con tecnologías convencionales, pero, gracias a los haces de electrones, podemos mejorar enormemente la tasa de reciclaje de aguas vertidas”, afirma el Sr. He. Se están ejecutando otros proyectos de demostración en las provincias de Xinjiang, Hubei y Guangxi. “Estamos trabajando para aplicar la tecnología de haces de electrones en diversas industrias de China”, apunta el Sr. He.

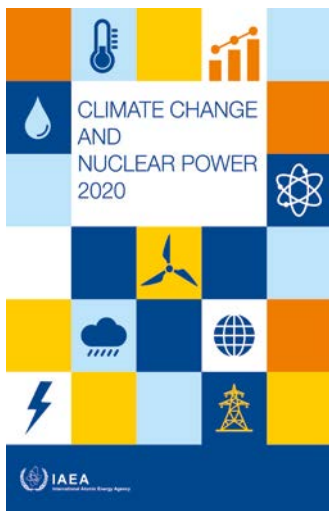
### Funcionamiento

En la industria textil se consumen grandes cantidades de agua y productos químicos, como colorantes, almidón, ácidos, sales y detergentes

que se vierten durante el proceso de producción. “Las técnicas de radiación mediante tecnología de haces de electrones pueden descomponer el gran volumen de contaminantes complejos contenidos en las aguas residuales y eliminarlos”, expresa el Sr. Han. En este proceso, un acelerador de electrones genera un haz de electrones capaz de ionizar moléculas de agua, con lo cual se generan radicales activos que reaccionan con los contaminantes orgánicos nocivos presentes en las aguas residuales. A continuación, estos contaminantes se degradan y se convierten en formas químicas más sencillas que pueden tratarse más fácilmente por métodos tradicionales.

“Este proyecto es un ejemplo destacado de cómo el pequeño apoyo inicial prestado por el OIEA mediante el programa de cooperación técnica y los proyectos coordinados de investigación puede contribuir a propiciar la aparición de una industria sostenible en un país”, manifiesta Gashaw Wolde, que gestiona los proyectos de cooperación técnica del OIEA en China. “Como resultado, se logran procesos industriales más limpios y eficientes que, sin duda, tienen repercusiones socioeconómicas a nivel nacional”.

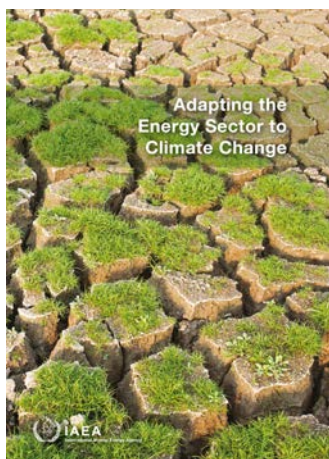
— Carley Willis



## Climate Change and Nuclear Power 2020

En esta publicación figura información actualizada sobre la situación actual de la energía nucleoelectrica y sus posibilidades de contribución, junto con otras fuentes de baja emisión de carbono, a las ambiciosas estrategias de mitigación que ayudarán al planeta a limitar el calentamiento global a 1,5 °C de conformidad con el Acuerdo de París de 2016. Desde 2000 el OIEA publica esa información y análisis de forma periódica a fin de apoyar a los Estados Miembros que opten por incluir la energía nucleoelectrica en su sistema energético, así como a los que se planteen otras estrategias. La publicación de 2020 se centra en el considerable potencial de la energía nuclear, integrada en un sistema energético con bajas emisiones de carbono, a efectos de contribuir al objetivo de 1,5 °C con fines de mitigación del cambio climático y en los desafíos derivados de hacer realidad este potencial. Se examinan los factores relativos a los sistemas energéticos y al mercado que afectan la transición a un sistema de suministro de energía con bajas emisiones de carbono. En esta edición también se resumen los avances necesarios para lograr el aumento de la capacidad a gran escala que se necesita para descarbonizar rápidamente el sistema energético mundial de acuerdo con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5 °C.

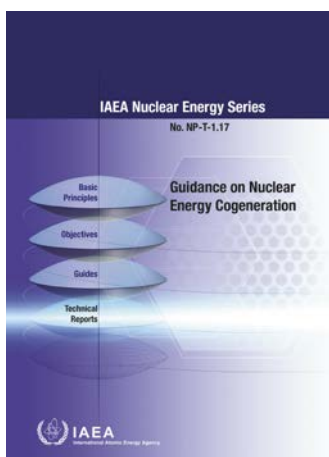
Publicaciones monográficas; ISBN: 978-92-0-115020-2; edición en inglés; 28,00 euros; 2020



## Adapting the Energy Sector to Climate Change

En esta publicación se explora el abanico de repercusiones en el sector energético que se derivan del cambio climático gradual y los fenómenos meteorológicos extremos, así como posibles formas de contrarrestarlas. Se analizan todos los elementos de la cadena de suministro: la base de recursos, la extracción y el transporte de fuentes de energía agotables y la generación, transmisión y distribución de energía. En la publicación se incluyen tres estudios de caso que evalúan la vulnerabilidad del sector energético de la Argentina, Eslovenia y el Pakistán.

Publicaciones monográficas; ISBN: 978-92-0-100919-7; edición en inglés; 40,00 euros; 2019



## Guidance on Nuclear Energy Cogeneration

En esta publicación se presenta una breve introducción a las ventajas, la experiencia y la futura planificación en cuanto a la aplicación de la cogeneración nuclear. También se destacan algunos proyectos de demostración que ya se han ejecutado en relación con las industrias y se exponen los conceptos técnicos en que reposan los complejos para combinar aplicaciones industriales y energía nuclear. El objetivo de esta publicación es que sea de interés para los usuarios del mundo académico y de la industria, así como para organismos gubernamentales e instituciones públicas que precisen información básica sobre diversos aspectos de la utilización de la energía nucleoelectrica para la cogeneración.

*Colección de Energía Nuclear del OIEA* N° NP-T-1.17; ISBN: 978-92-0-104119-7; edición en inglés; 32,00 euros; 2019

Si necesita información adicional o desea encargar un libro,  
póngase en contacto con:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
P.O. Box 100, A-1400 Viena, Austria  
Correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)



# SCIENTIFIC FORUM

LA ENERGÍA NUCLEAR Y EL CLIMA



**IAEA**

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

2020

#Atoms4Climate

Lea este y otros números del Boletín del OIEA en línea en  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Para más información sobre el OIEA y su labor, visite [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

síguenos en

