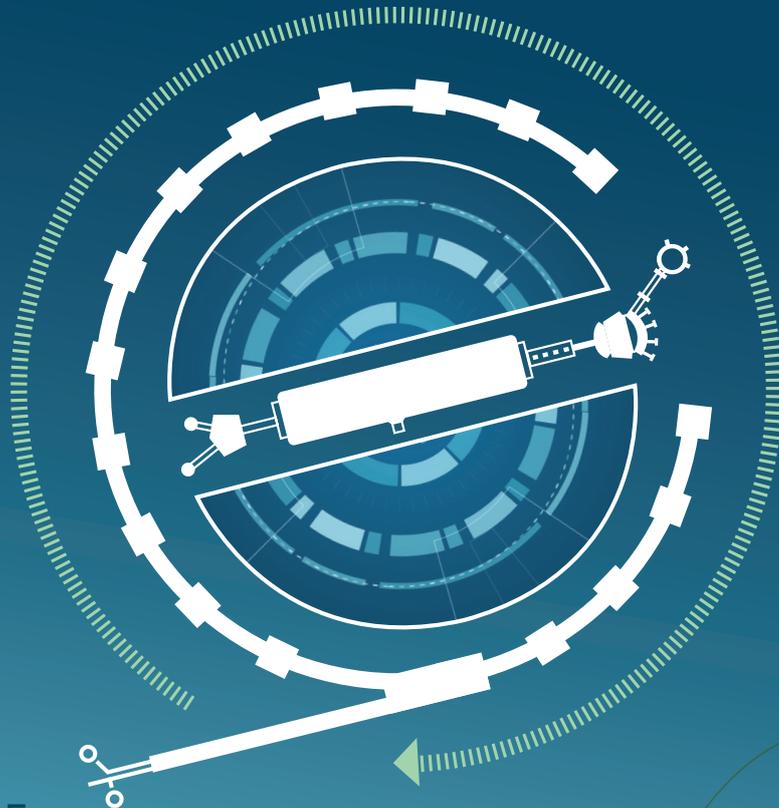


IAEA BULLETIN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

La publicación emblemática del OIEA | Mayo de 2022 | www.iaea.org/es/bulletin

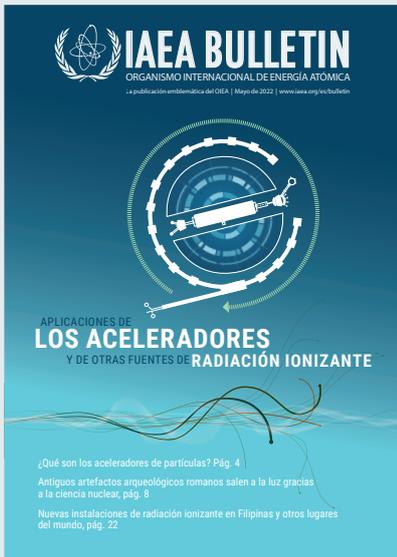


APLICACIONES DE **LOS ACELERADORES** Y DE OTRAS FUENTES DE **RADIACIÓN IONIZANTE**

¿Qué son los aceleradores de partículas? Pág. 4

Salen a la luz antiguos artefactos arqueológicos romanos gracias a la ciencia nuclear, pág. 8

Nuevas instalaciones de radiación ionizante en Filipinas y otros lugares del mundo, 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 Viena, Austria
Teléfono: (43-1) 2600-0
iaeabulletin@iaea.org

Director editorial: Michael Amdi Madsen

Editor: Miklos Gaspar

Diseño y producción: Ritu Kenn

El BOLETÍN DEL OIEA puede consultarse en línea en
www.iaea.org/es/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, salvo cuando se trate de una reseña.

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: OIEA

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 ámbitos como la salud humana, la alimentación, el agua, la industria y el medio ambiente.

Además de proporcionar una plataforma mundial para el fortalecimiento de la seguridad física nuclear, el OIEA ha creado la *Colección de Seguridad Física Nuclear*, cuyas publicaciones, que gozan del consenso internacional, ofrecen orientaciones sobre ese tema. 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. Estas 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 lleva adelante, 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).

Aceleradores y tecnología de la radiación para el desarrollo sostenible

Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA

“Los protones dan a un átomo su identidad, los electrones, su personalidad”. Con esta imaginativa fórmula describió el escritor Bill Bryson la composición de toda la materia. Pero también es una manera adecuada de referirse a los elementos básicos del universo. Cada partícula atómica, elemento químico e isótopo revela información sobre la naturaleza, el pasado y el potencial de la materia que forma. Los aceleradores y demás tecnologías de la radiación son instrumentos de gran valor para estudiar los átomos y trabajar con ellos.

Los aceleradores pueden revestir muchas formas y tamaños, y en la actualidad existen más de 20 000 en funcionamiento en todo el mundo. Ayudan a crear radiofármacos, curar enfermedades, preservar alimentos, monitorizar el medio ambiente, fortalecer materiales, comprender la física fundamental, estudiar el pasado e incluso resolver delitos.

Esta edición del *Boletín del OIEA* explora distintos tipos de aceleradores y examina las numerosas maneras en que el OIEA presta apoyo a las aplicaciones de estos en los ámbitos de la salud, la agricultura, la investigación, el medio ambiente y la industria. Muchas técnicas de aceleradores funcionan y ofrecen todos estos beneficios a partir de diferentes tipos de radiación. Un gran número de aplicaciones industriales que utilizan aceleradores y fuentes de radiación son esenciales para la economía mundial y con miras a alcanzar el desarrollo sostenible.

Los laboratorios del OIEA en Seibersdorf (Austria) prestan apoyo a investigadores de todo el mundo a fin de utilizar la radiación ionizante de distintas maneras, por ejemplo, para desarrollar cultivos resilientes al estrés ambiental, así como para esterilizar a los insectos macho que se emplean en una técnica especial de control de plagas que acaba con las poblaciones de mosquitos, moscas tsetse y mosca de la fruta en América Latina, África, Asia y Europa.

Este número del *Boletín* también aborda la manera como la radiación ionizante ha ayudado a preservar una embarcación antigua; cómo se utiliza para reutilizar y reciclar plásticos; de qué manera puede proteger los alimentos de las plagas y la descomposición, y cómo ayuda a autenticar y datar objetos.



En el OIEA contribuimos a fomentar la innovación en la esfera de los aceleradores y las tecnologías de la radiación. Para ello, este año acogeremos dos conferencias importantes: la Conferencia Internacional sobre Aceleradores para la Investigación y el Desarrollo Sostenible, la primera de estas características, y la Segunda Conferencia Internacional sobre las Aplicaciones de la Ciencia y la Tecnología de la Radiación, un encuentro que no solo se ocupará de los aceleradores, sino que también explorará las posibilidades de aplicación, en sentido más amplio, de las fuentes de radiación ionizante existentes.

Estos eventos reunirán a las comunidades que utilizan y que más se benefician de estas tecnologías y les brindarán la posibilidad de poner en común sus experiencias y prácticas óptimas y, de esta manera, promover y difundir los avances científicos en pro del desarrollo.

Mientras la sociedad vuelve la vista hacia la ciencia para encontrar la solución a los grandes desafíos existenciales, la comunidad científica busca respuestas en los aceleradores y sus aplicaciones. Y ahí está el OIEA, a su lado, trabajando para que países de todos los continentes tengan acceso a esta aplicación nuclear tan poderosa como beneficiosa.



(Fotografía: A. Abrunhosa/Universidad de Coimbra)

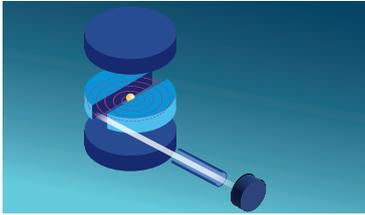


(Fotografías: OIEA)





1 Aceleradores y tecnología de la radiación para el desarrollo sostenible



4 ¿Qué son los aceleradores de partículas?



6 El uso de aceleradores para comprender el medio ambiente y abordar la contaminación



8 Salen a la luz antiguos artefactos arqueológicos romanos gracias a la ciencia nuclear

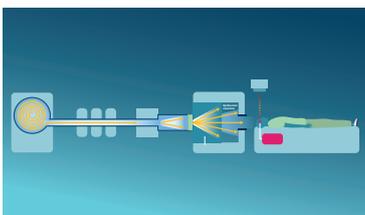


10 La contaminación por plásticos

El reciclado mediante radiación para proteger el medio ambiente



12 Optimización del control de plagas de los alimentos mediante la irradiación

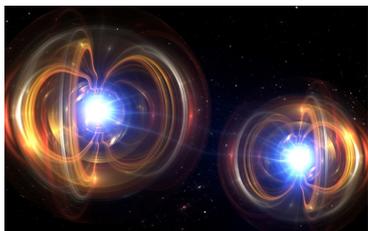


14 Neutrones para las neuronas y ciclotrones para los radioisótopos



16 Átomos para sacar a la luz la verdad

Técnicas analíticas basadas en aceleradores detectan falsificaciones de obras de arte



18 Modificación cuántica

Uso de los aceleradores para implantar átomos individuales en la biodetección



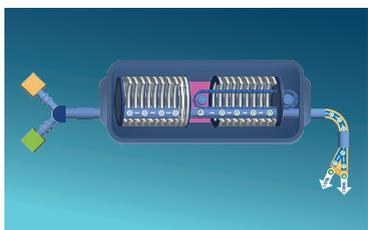
20 Técnicas nucleares para el desarrollo de materiales avanzados



22 Nuevas instalaciones de radiación ionizante en Filipinas y otros lugares del mundo



24 Legislar en pro de los usos pacíficos y tecnológica y físicamente seguros de las instalaciones de irradiación



26 Lo que hay que saber sobre los haces de iones

ENTREVISTA

28 Irradiación industrial para un mundo mejor

PANORAMA MUNDIAL

30 MYRRHA: Un sistema accionado por acelerador para la gestión de desechos radiactivos

— Hamid Ait Abderrahim, Director General Adjunto de Asuntos Internacionales en el SCK•CEN y Director del proyecto MYRRHA

NOTICIAS DEL OIEA

32 Noticias del OIEA

36 Publicaciones

¿Qué son los aceleradores de partículas?

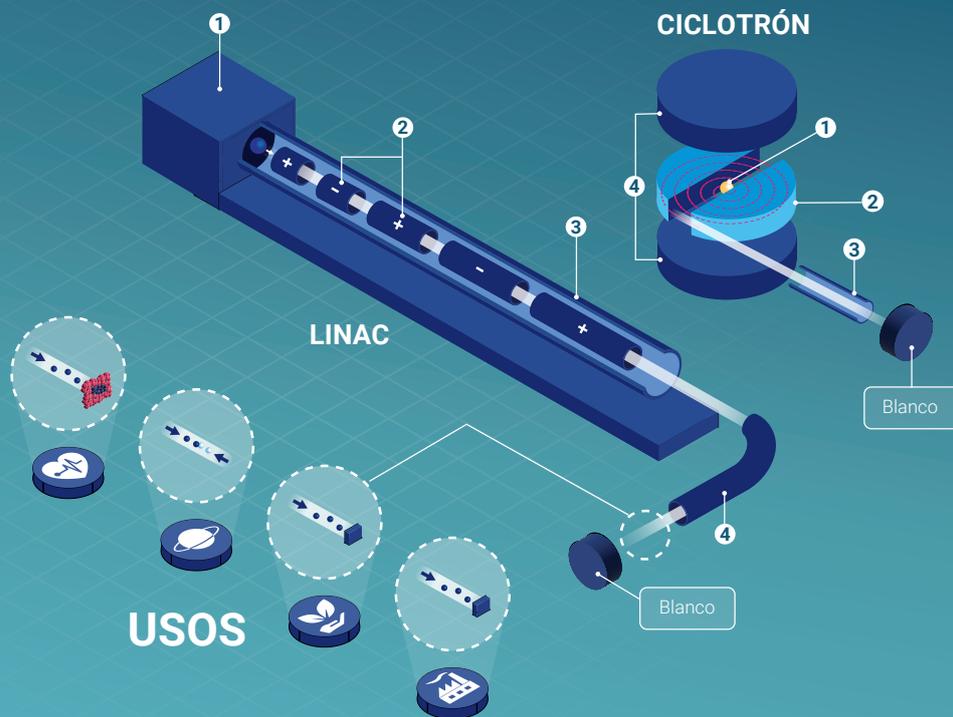
Sotirios Charisopoulos y Wolfgang Picot

PARTES PRINCIPALES DE LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Los aceleradores de partículas producen y aceleran haces de partículas cargadas, tales como electrones, protones e iones, de tamaño atómico y subatómico. Se utilizan no solo en la investigación básica para entender mejor la materia, sino también en un sinnúmero de aplicaciones socioeconómicas relacionadas con los campos de la salud, la monitorización radiológica del medio ambiente, la calidad de los alimentos, las tecnologías aeroespaciales y para la producción de energía, entre otros.

Los aceleradores de partículas pueden ser lineales (rectos) o circulares, y su tamaño varía: pueden tener decenas de kilómetros de longitud o caber en una habitación pequeña. Todos ellos, sin embargo, constan de los siguientes cuatro componentes principales:

- 1 una fuente que produce las partículas cargadas;
- 2 un dispositivo compuesto que carga las partículas de energía y las acelera aplicando un campo eléctrico estático u oscilante;
- 3 una serie de tubos metálicos en los que se han aplicado tecnologías de vacío para que las partículas se muevan libremente sin colisionar con moléculas de aire o polvo, lo cual podría disipar el haz, y
- 4 un sistema de electroimanes que dirigen y centran los haces de partículas o que cambian la trayectoria de estos antes de que sean bombardeados en la muestra que sirve de blanco.



USOS DE LOS HACES DE PARTÍCULAS



SALUD

Los haces se utilizan para esterilizar equipo médico y producir los radioisótopos necesarios para sintetizar los radiofármacos que se usarán en el diagnóstico y el tratamiento del cáncer. Los aceleradores de grandes dimensiones pueden destruir células cancerosas, desvelar la estructura de proteínas y virus y perfeccionar vacunas y nuevos fármacos.



INVESTIGACIÓN

Algunos aceleradores, los más grandes, se utilizan para hacer que las partículas subnucleares colisionen a fin de ampliar nuestro conocimiento del universo. Algunos de estos aceleradores también se usan para producir neutrones.



MEDIO AMBIENTE

Los haces de protones pueden emplearse para detectar oligoelementos químicos presentes en el aire, el agua o el suelo. Por ejemplo, pueden mostrar la tasa de concentración y la composición de distintos contaminantes, y ofrecer una indicación clara de la calidad del aire.



INDUSTRIA

Los haces pueden interactuar con los átomos de un material que sirve de blanco, por ejemplo, para hacer que este material sea más duradero.

TIPOS DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS

IMPLANTADORES IÓNICOS

Estos aceleradores se usan ampliamente en la industria para, por ejemplo, lograr que los materiales sean más resistentes a los daños debidos al uso y el desgaste. Existen en todo el mundo unos 12 000 implantadores iónicos que ayudan a fabricar semiconductores para teléfonos inteligentes y paneles solares, así como para endurecer acabados de metal, cerámica o vidrio. Los implantadores iónicos pueden, además, mejorar la fiabilidad de los materiales utilizados en los implantes de uso médico.

LINAC

Los aceleradores lineales (o linac) pueden tener una longitud de unos pocos metros o de varios kilómetros. Muchos de ellos se usan en la investigación científica. Los aceleradores lineales instalados en los hospitales emiten rayos X que se dirigen a las células tumorales para destruirlas. En todo el mundo, hay unos 1000 aceleradores lineales de uso médico en funcionamiento.

SINCROTRONES

Los sincrotrones, de los que hay más de 70 en todo el mundo, son los aceleradores de partículas de mayores dimensiones. Se utilizan para la investigación científica y nos ayudan a entender las leyes fundamentales del universo. Los científicos usan los sincrotrones para llevar a cabo estudios en las esferas de la química, la biomedicina, el patrimonio natural y cultural, el medio ambiente y muchas otras.

USOS DE LOS ACELERADORES DE HACES DE ELECTRONES EN LA INDUSTRIA

En todo el mundo hay cerca de 10 000 aceleradores de haces de electrones en funcionamiento. Pueden contribuir, por ejemplo, a mejorar la resistencia de los materiales bajo temperaturas extremas o cuando entran en contacto con sustancias químicas. Los haces de electrones también se utilizan para esterilizar productos de uso médico y alimentos, así como para desinfectar las aguas negras. Se emplean de manera generalizada en las industrias automotriz y aeroespacial para la construcción de máquinas, y también recurren a ellos los fabricantes de productos médicos.

CICLOTRONES

Los más de 1200 ciclotrones existentes en todo el mundo crean haces de protones o de deuterones para usos médicos. Producen los radioisótopos que se utilizan en imagenología médica para el diagnóstico y el tratamiento del cáncer. Muchos ciclotrones se encuentran en hospitales y su finalidad es producir radiofármacos a partir de radioisótopos de período corto.

ACELERADORES ELECTROESTÁTICOS

Estos aceleradores, en particular los aceleradores tándem, son menos costosos, y los científicos los usan para investigar las propiedades de los materiales, monitorizar el medio ambiente, prestar apoyo a investigaciones en el campo de la biomedicina o estudiar objetos del patrimonio cultural, entre otras cosas. Actualmente existen 300 máquinas de estas características en todo el mundo, y los expertos prevén que este número aumente en los próximos años.

HOY EN DÍA
HAY MÁS DE
20 000
ACELERADORES
EN FUNCIONAMIENTO
EN TODO EL MUNDO

DIMENSIONES

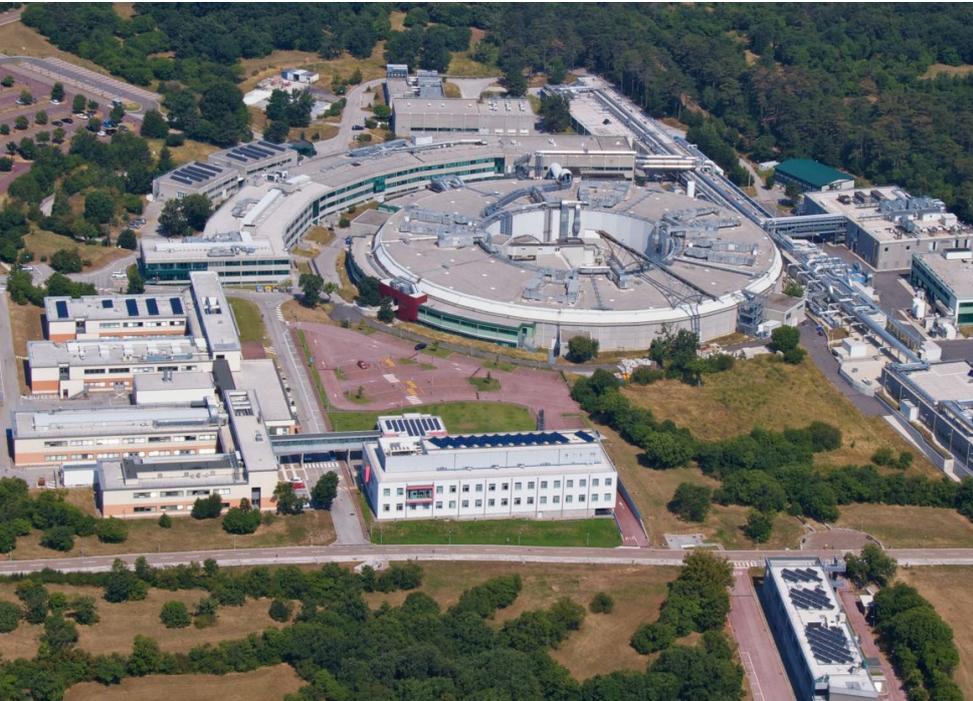


PUEDA CABER EN UNA
HABITACIÓN PEQUEÑA
LINAC DE
USO MÉDICO

O MEDIR DECENAS
DE KILÓMETROS
SINCROTRÓN

El uso de aceleradores para comprender el medio ambiente y abordar la contaminación

Lenka Dojcanova



Elettra-Sincrotrone Trieste en Italia.

(Fotografía: Elettra-Sincrotrone Trieste)

Los metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas pueden contaminar el aire, el agua y el suelo y, como consecuencia, la flora y la fauna. A fin de contrarrestar los efectos de estos elementos, los científicos necesitan primero comprender mejor su comportamiento. Para ello pueden utilizarse aceleradores, los cuales, mediante la emisión de haces de partículas cargadas contra determinados materiales, permiten analizar dichos materiales o modificar su superficie, composición, estructura u otras propiedades.

“Las técnicas basadas en aceleradores ofrecen capacidades únicas y proporcionan información muy valiosa sobre la contaminación de forma rápida, rentable y no destructiva —indica Román Padilla, Físico de Instrumentación Nuclear del OIEA—. Los aceleradores de partículas utilizados para entender y mejorar el medio ambiente tienen muchas formas y tamaños distintos, y, en particular, los métodos de haces iónicos basados en aceleradores pueden ayudarnos a caracterizar muestras de suelo, sedimentos, biota, agua o de partículas finas suspendidas en el aire”.

Los aceleradores electrostáticos son los que más se utilizan para caracterizar muestras de monitorización radiológica del medio ambiente (véase la página 4).

La evaluación de la contaminación atmosférica y del agua es vital para abordar la salud mundial. El 60 % de la población mundial y las 13 ciudades más grandes del mundo están en Asia. En las zonas más urbanizadas del continente, la contaminación atmosférica y del agua son una cuestión prioritaria. A fin de ayudar a los expertos a caracterizar las muestras de aire, el OIEA ha estado colaborando con 15 países de Asia en la recolección semanal de muestras de partículas finas y gruesas en suspensión, que afectan el aire que respiran más de 110 millones de personas. Entre 2002 y 2017, las técnicas de haces iónicos basadas en aceleradores no solo revelaron la presencia de muchos elementos en las muestras recolectadas, sino que también ayudaron a identificar posibles fuentes de contaminación atmosférica.

Además, se pueden utilizar haces de electrones, que son diferentes de los haces iónicos (véase la página 26), para tratar las aguas residuales

o los plásticos (véase la página 10). Por ejemplo, esta técnica tiene una ventaja clara frente a las tecnologías convencionales de tratamiento del agua, tales como los tratamientos químicos y biológicos, porque, en el caso de los haces de electrones, no se necesitan desinfectantes químicos para destruir los microorganismos. En la provincia de Hubei (China), hay una instalación de tratamiento especializada que se sirve de la tecnología de haces de electrones para esterilizar las aguas residuales médicas y descomponer los antibióticos. Con capacidad para tratar 30 millones de litros de aguas residuales industriales al día, se trata de la mayor instalación del mundo de tratamiento de aguas residuales mediante irradiación y se construyó con tecnología facilitada por el OIEA. Este proceso de tratamiento permite ahorrar 4500 millones de litros de agua dulce al año, cantidad suficiente para satisfacer el consumo de 100 000 personas.

Por otro lado, también se utilizan los sincrotrones, un tipo especial de acelerador con forma de anillo, en estudios ambientales para ayudar a los expertos a analizar elementos químicos, registrar su distribución en mapas y determinar la especie química a la que pertenecen. Mediante el uso de los rayos X como sonda, estos aceleradores complejos pueden utilizarse en procesos industriales y de minería en los que los métodos tradicionales no pueden proporcionar datos suficientes para predecir los posibles efectos ambientales, la biodisponibilidad o los riesgos que presenta la contaminación. En el campo de la minería, por ejemplo, los sincrotrones

ayudan a predecir el comportamiento futuro, como el movimiento de los metales y minerales o su disolución.

Desde hace más de siete años, el OIEA opera conjuntamente con el centro Elettra Sincrotrone Trieste de Italia estaciones finales de espectrometría y de la línea de haces de fluorescencia de rayos X (XRF) multipropósito y ha desarrollado *hardware* y métodos analíticos nuevos. Mediante ese tipo de colaboraciones, el OIEA presta apoyo y fomenta las actividades de investigación y capacitación basadas en la radiación sincrotrónica dirigidas a grupos de investigación, particularmente en países con limitada experiencia y recursos limitados para acceder a instalaciones de radiación

sincrotrónica y utilizarlas. Estos experimentos han contribuido al estudio de cuestiones ambientales en varios países, entre ellas la presencia de partículas finas de aerosoles en la atmósfera y espacios interiores en Hungría y Jordania, la distribución espacial del plomo en la vegetación que crece en las cercanías de las zonas mineras de España, la distribución y el estado químico del cadmio acumulado en ostras y vieiras en Italia, la presencia de titanio en suelos agrícolas mejorados con lodo procedente de plantas de tratamiento de aguas en México y los procesos microscópicos que tienen lugar en la reducción de contaminantes en los ríos italianos contaminados a causa de la minería.

1

Se recolectan muestras ambientales del lugar.

Las muestras pueden ser de aire, agua, sedimentos o biota.



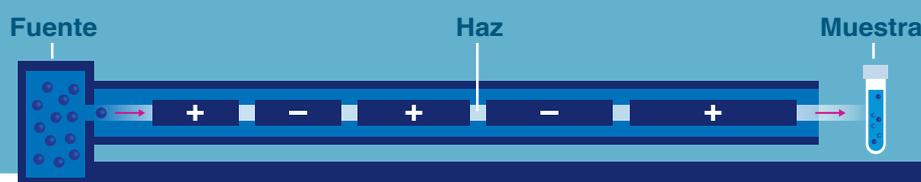
2

Se lleva la muestra a la instalación donde será analizada.



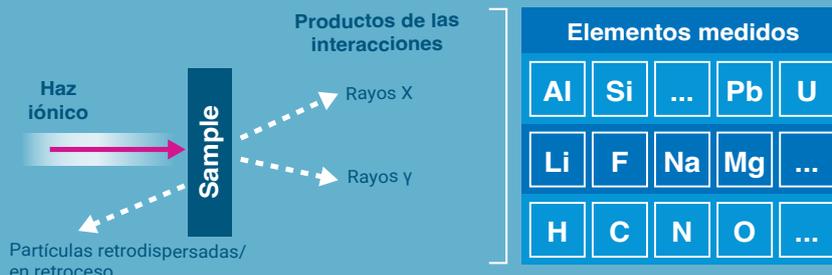
3

Con un acelerador de partículas, se bombardea la muestra con haces iónicos.



4

Los iones (H, He, C) interactúan de diferentes formas con la muestra y se miden los productos de estas interacciones para determinar la concentración de los elementos presentes en la muestra.



Salen a la luz antiguos artefactos arqueológicos romanos gracias a la ciencia nuclear

Michael Amdi Madsen

En 1996, el buceador belga René Wauters hizo un descubrimiento arqueológico único. Mientras exploraba las aguas que rodean Vele Orjule, un islote croata en el mar Adriático, que alcanzan los 45 metros de profundidad, descubrió una misteriosa estatua de bronce de la antigüedad. Los investigadores la estudiaron cuidadosamente durante más de una década, usando para ello técnicas nucleares, a fin de determinar su edad, origen e incluso los métodos de construcción.

Desnudo y musculoso, Apoxiómeno representa un atleta quitándose el sudor y el polvo del cuerpo. Tras sacarla del mar en 1999, la estatua, muy dañada por la corrosión, fue sometida a un largo proceso de desalación y restauración que duró hasta 2005. Al acabar, los arqueólogos se mostraron desconcertados: el tema de Apoxiómeno es un tema recurrente; ¿se trataba, pues, de una estatua romana o griega? No hubo forma de averiguar su origen hasta 2009, cuando un acelerador ayudó a arrojar algo de claridad.

“Para desentrañar el pasado de Apoxiómeno tuvimos que aplicar varias técnicas nucleares que nos permitieron comprender mejor su estructura a nivel atómico”, dice Lena Bassel, Oficial de Proyectos Asociada para la ciencia del patrimonio en el OIEA que trabaja con expertos de todo el mundo en la aplicación de técnicas nucleares para la caracterización de artefactos. La Sra. Bassel cita un estudio publicado en la revista *Journal of Archaeological Science* en 2010 en el que los investigadores, que habían aplicado la espectrometría de masas con aceleradores al material orgánico hallado en el interior de Apoxiómeno, pudieron determinar mediante la datación por carbono 14 que la estatua se hizo entre el año 100 a. C. y el año 250 d. C.

Los investigadores también aplicaron un método basado en aceleradores llamado emisión de rayos X inducida por micropartículas (PIXE) para determinar la composición original de la aleación y la espectrometría de masas multicolectora con plasma acoplado por inducción para conocer mejor la composición isotópica del plomo de la estatua. Los isótopos son formas específicas de un elemento químico que tienen una masa atómica y unas propiedades físicas diferentes. Partiendo de la proporción de los diferentes isótopos del plomo presentes en una muestra y comparando esa proporción con las propiedades conocidas de las zonas geográficas, los científicos pueden determinar la procedencia de la muestra. “Gracias a esta técnica analítica basada en aceleradores, pudieron situar



El equipo de investigación usó técnicas basadas en aceleradores a fin de determinar la edad, el origen y los métodos de construcción de Apoxiómeno.

(Fotografía: Vassil / Wikimedia Commons)

el origen del plomo de la estatua en los Alpes orientales o Cerdeña, y concluyeron que la estatua era una copia romana de un original griego”, dice la Sra. Bassel.

Cinco años más tarde, los investigadores volvieron a examinar a Apoxiómeno utilizando una técnica PIXE de alta resolución lateral y descubrieron que los labios incrustados en la estatua estaban hechos de un cobre muy puro, sin alea. Mediante radiografías de rayos X, pudieron saber cómo se insertaron y fijaron las incrustaciones y determinar las sofisticadas técnicas de fundición y unión empleadas para las extremidades. Los investigadores llegaron a la conclusión de que Apoxiómeno era, sin duda, una copia de una estatua mucho más antigua, de mediados del siglo IV a. C., hecha mediante una técnica indirecta de fundición a la cera perdida en la que se usaba una aleación con una composición baja en plomo.

“Las técnicas basadas en aceleradores tienen un papel importante en la caracterización de los objetos del patrimonio, y Apoxiómeno nos muestra que a menudo es necesario utilizar un método que combine varios tipos de análisis. El OIEA fomenta estos tipos de aplicaciones”, dice la Sra. Bassel. Desde 2018, el OIEA y sus Estados Miembros han promovido el uso de “Átomos para el patrimonio”, y el año pasado crearon una alianza estratégica con la Universidad de París-Saclay de Francia para potenciar el uso de las

técnicas nucleares en la caracterización y preservación del patrimonio natural y cultural. En colaboración con el OIEA, la universidad centrará su atención en la investigación y el desarrollo científicos, así como en la transferencia de conocimientos y el intercambio de mejores prácticas con expertos de todo el mundo.

Los romanos salen del Ródano

El uso de las técnicas nucleares en el campo de la arqueología no se limita a la caracterización, y la irradiación ha desempeñado durante mucho tiempo un papel importante en la conservación de artefactos. Si bien uno de los casos más famosos es el de la momia de 3200 años de antigüedad del faraón egipcio Ramsés II, que se irradió en 1977 para eliminar hongos e insectos, esta tecnología se ha estado utilizando continuamente en muchos otros proyectos desde ese entonces.

En 2004 se descubrió una barca romana del siglo I de nuestra era a menos de cuatro metros bajo la superficie del río Ródano en Arles (Francia). La barca de roble, a la que se le dio el nombre de “Arles-Rhône 3”, mide 31 metros de longitud y probablemente se hundió a causa de una inundación repentina que la cubrió con una capa de arcilla fina.

“La arcilla ayudó a preservar la barca y los valiosos objetos que contenía, pero las bacterias anaeróbicas disolvieron la celulosa de la madera, que fue sustituida por agua. Esto supuso un desafío cuando en 2011 los investigadores planeaban sacar la barca del lecho del río y exhibirla en un museo, ya que la madera se desintegraría al secarse”, dice Laurent Cortella, Ingeniero de Investigación de ARC-Nucléart, un taller de restauración y conservación de Grenoble.

ARC-Nucléart encontró una solución: bañaron la madera en polietilenglicol, la liofilizaron y sometieron partes de la barca a tratamiento por irradiación. “Como si secan pegamento con un secador de pelo, los restauradores utilizaron la irradiación para

solidificar la resina radiocurable y mantener unida la estructura fibrosa de la madera”, explica Bum Soo Han, Radioquímico del OIEA que trabaja en el marco de “Átomos para el patrimonio” para promover el uso de las tecnologías de irradiación en el campo de la conservación del patrimonio cultural. El Sr. Han, que ofrece apoyo técnico a iniciativas de preservación del patrimonio cultural en todo el mundo, señala que la demanda de este tipo de aplicaciones va en aumento.

“Se puede visitar el Arles-Rhône 3 hoy en día en el Museo Departamental de la Antigua Arles, pero no es necesario ir a Francia para ver artefactos conservados mediante irradiación, ya que estas técnicas se aplican ampliamente”, dice el Sr. Han. En 2017, el OIEA editó *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, una publicación en la que se presentan ejemplos de la aplicación exitosa de estas técnicas en todo el mundo. El Sr. Han está trabajando actualmente en la próxima publicación de esa colección del OIEA, que se centrará en las buenas prácticas en la desinfección de bienes y archivos del patrimonio cultural mediante el uso de la radiación ionizante. Está previsto que salga a la luz en 2023.



La antigua barca romana Arles-Rhône 3 se ha conservado mediante técnicas nucleares y está expuesta en el Museo Departamental de la Antigua Arles (Francia).

(Fotografía: Cd13/MdDa/Chaland Arles Rhône 3 © Remi Benali)

La contaminación por plásticos

El reciclado mediante radiación para proteger el medio ambiente

Puja Daya

Separada por más de 5000 kilómetros de la masa continental más cercana, la isla Henderson es tal vez el lugar más aislado del planeta. Sin embargo, a pesar de estar completamente deshabitada, esta isla paradisíaca del Pacífico Sur está cubierta por más de 4000 millones de piezas y partículas de plástico. La basura que recubre las playas de Henderson no solo arruina el paisaje, sino que también es letal para la vida marina, que acaba asfixiada o atrapada entre los residuos. Estos restos de plástico son solo un ejemplo del destino que siguen los más de 8000 millones de toneladas de plástico que se han producido desde 1950.

El OIEA trabaja con expertos de todo el mundo para cambiar ese destino y proteger la vida marina y el medio ambiente de la contaminación por plásticos. Con sus asociados, el OIEA investiga y desarrolla técnicas de radiación ionizante para volver a procesar y reciclar los plásticos de manera asequible. Estas técnicas utilizan aceleradores de haces de electrones (véase la página 26) para irradiar los plásticos posconsumo a fin de reciclarlos y transformarlos en otros productos más fácilmente.

Esta técnica es prometedora dado que no es completamente nueva y tiene una larga historia de éxitos alcanzados. Los polímeros irradiados se encuentran en todas partes, desde el caucho de los neumáticos de un automóvil hasta las tuberías de agua caliente y los envases de los alimentos. “Si podemos utilizar esta tecnología en aplicaciones industriales para dar propiedades nuevas a los plásticos, nada nos impide utilizar la irradiación también para transformar y reestructurar el plástico a fin de mejorar su reciclabilidad y reducir la cantidad de plástico que se desecha”, explica Celina Horak, Jefa de la Sección de Productos Radioisotópicos y Tecnología de la Radiación del OIEA.

Los plásticos están compuestos por diferentes tipos de polímeros —sustancias formadas por cadenas o redes largas de grupos de átomos que se repiten llamadas monómeros—.

Se han producido 8000 millones de toneladas de plástico desde 1950. Gran parte permanece sin reciclar en vertederos, océanos o playas.

(Fotografía: M. Gaspar/OIEA)

La irradiación de polímeros produce en estos diferentes efectos que son beneficiosos para reciclar, reducir y reutilizar los residuos plásticos.

Un nuevo proyecto coordinado de investigación del OIEA centrado en desarrollar el uso de la radiación ionizante en el reciclado de desechos poliméricos está encabezando la investigación en esta esfera. “La irradiación de materiales ya no es solo un instrumento de fabricación, sino también un instrumento de reciclado, por lo que las técnicas de radiación ionizante utilizadas para modificar polímeros también sirven para procesar los desechos”, indica Bin Jeremiah Barba, especialista en Investigación Científica del Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares. Su instituto representa solo uno de los 18 países que están colaborando para examinar cómo los procesos en que se utiliza la radiación, como la reticulación, la escisión de cadenas, el injerto y otras modificaciones de superficies, pueden ayudar a los países a desarrollar metodologías de reciclado más asequibles y accesibles.

Reticulación de polímeros

El proceso de reticulación consiste en el uso de la irradiación con haces de electrones para formar conexiones entre las cadenas poliméricas. Al conectar entre sí las cadenas poliméricas, se mejoran las propiedades del material y este se puede utilizar para crear productos más duraderos, más resistentes y de mejor calidad. Esta es una práctica común en la fabricación de neumáticos para vehículos porque permite a los fabricantes disminuir el tamaño y grosor del caucho, lo que reduce los costos de materia prima y producción y hace que el producto sea más sostenible.

Degradación de polímeros

En este caso se utiliza la irradiación de manera casi opuesta por medio de la escisión de cadenas —un proceso mediante el cual los polímeros se dividen o “degradan”—. “Este proceso

hace que los materiales se vuelvan más quebradizos y que sea más fácil triturarlos hasta obtener polímeros más finos. Por ejemplo, el politetrafluoroetileno, un revestimiento químico más comúnmente conocido por su nombre comercial, Teflón, se degrada para posteriormente utilizarlo en lubricantes para motores y aditivos para tintas”, dice Olgun Güven, experto en radiación de polímeros en la Universidad de Hacettepe que dirige algunas iniciativas en Türkiye. En el marco del proyecto coordinado de investigación, el grupo de expertos analiza cómo se puede utilizar la escisión de cadenas en el reciclado químico, por medio del cual un producto se descompone en su forma química básica para generar nuevas materias primas o combustible. El uso de la escisión de cadenas para el reciclado podría mejorar enormemente la producción de productos nuevos a partir de polímeros de un solo uso, explica.

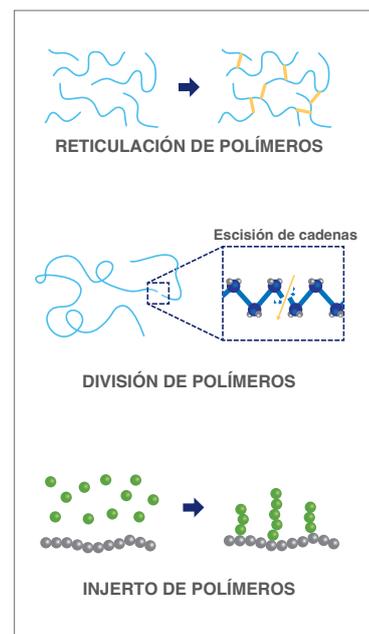
Injerto de polímeros

Injertar es un proceso que consiste en hacer crecer sobre la superficie de otro polímero una cadena polimérica corta adaptada a fin de modificar sus propiedades. Esta misma técnica se puede utilizar para combinar polímeros que normalmente serían incompatibles entre sí y poder, de este modo, remodelar y reestructurar más fácilmente los residuos.

Estas técnicas son solo algunas formas en que el OIEA está explorando el uso de la radiación ionizante para el reciclado de los residuos plásticos. “Los mismos instrumentos utilizados en la industria se pueden aplicar al reciclado y son una parte asequible y accesible de la solución para reducir los residuos plásticos que dañan nuestro medio ambiente”, dice la Sra. Horak. También señala que el proyecto coordinado de investigación que se encuentra en curso mejorará y validará esta tecnología de reciclado del plástico y ayudará a determinar su viabilidad para que la utilicen los países. Además, establecerá un plan para transferir conocimientos y ponerlos en práctica.

Con el objeto de mejorar a nivel mundial las capacidades en la aplicación de técnicas de radiación innovadoras para reducir los residuos plásticos por medio del reciclado, el OIEA puso en marcha en 2021 la iniciativa Tecnología Nuclear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics), que se dedica a ayudar a los países a utilizar diversas técnicas nucleares. Ofrece pruebas científicas que permiten caracterizar y evaluar la contaminación marina por microplásticos y, al mismo tiempo, demuestra el uso de la radiación ionizante para reciclar plásticos y transformar desechos plásticos en recursos reutilizables.

NUTEC Plastics incluye proyectos coordinados de investigación que ayudan a proporcionar datos científicos precisos a fin de orientar políticas sobre la contaminación por plásticos, fortalecer la metodología utilizada para realizar un seguimiento de los plásticos y mejorar la escalabilidad de la tecnología de reciclado. Los proyectos de cooperación técnica del OIEA en el marco de esta iniciativa ofrecen a investigadores equipo y capacitación para transferir conocimientos y facilitar los proyectos sobre el reciclado de plásticos. La elaboración de directrices ayudará a que los países establezcan y pongan en funcionamiento instalaciones para utilizar técnicas nucleares a fin de hacer frente a la contaminación por plásticos.



Optimización del control de plagas de los alimentos mediante la irradiación

Joanne Liou

Cuando hablamos de especias, semillas, frutas y vegetales que viajan desde lugares lejanos hasta la tienda local, sucede mucho más de lo que parece. Una pequeña dosis de radiación ayuda a que los productos alimenticios permanezcan frescos y resistan el trayecto sin propagar organismos invasores.

El OIEA, en asociación con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), está prestando apoyo a los avances más recientes en los campos de la irradiación fitosanitaria y de alimentos, a fin de optimizar el proceso de control de plagas y facilitar el comercio internacional. La irradiación fitosanitaria y de alimentos son tratamientos poscosecha que utilizan la radiación ionizante producida por una fuente, como el cobalto 60, o generada por aceleradores.

“La radiación ionizante no afecta a los alimentos, pero sí a los microbios o las plagas invasoras, y posibilita el comercio internacional”, dice Carl Blackburn, Especialista en Irradiación de Alimentos en el Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura.

La irradiación hace posible que productos alimenticios, como las fresas, permanezcan frescos y resistan largos trayectos.

(Fotografía: R. Mithare/Unsplash)

Dispositivos de irradiación *in situ*

Antes de ser enviados a su destino final, ciertos productos alimenticios primero se preparan o recogen en su lugar de origen, se envasan y finalmente se transportan a una instalación de irradiación. Estas instalaciones suelen emplear el cobalto 60 como fuente de la radiación ionizante. “Es fácil utilizar el cobalto 60 para los rayos gamma, pero puede ser complicado adquirirlo y transportarlo —explica el Sr. Blackburn—. El OIEA ha estado impulsando un nuevo enfoque optimizado que lleva la irradiación a las instalaciones en forma de radiación blanda, como haces de electrones de baja energía y rayos X de baja energía, lo que permite que el irradiador pueda estar dentro de una fábrica de alimentos o una instalación de envasado”.

En 2021, un proyecto coordinado de investigación del OIEA demostró la viabilidad del empleo de haces de electrones de baja energía y rayos X blandos para reducir la infestación y la contaminación microbiana. “Esto quiere decir que los haces de electrones de baja energía, o electrones blandos, pueden emplearse como tratamiento superficial y no afectan las propiedades cualitativas —dice Setsuko Todoriki, participante en el proyecto y Jefa de Investigación en la Organización Nacional de Investigación Agrícola y Alimentaria del Japón—. Debido a la energía considerablemente más baja en comparación con los haces de electrones convencionales, los haces de



electrones de baja energía podrían introducirse en la línea de procesamiento y operar *in situ*". En el proyecto también se desarrollaron métodos de dosimetría para los rayos X blandos. En el marco de un nuevo proyecto coordinado de investigación en marcha dedicado a los tratamientos con haces de baja energía se está desarrollando y fomentando más la innovación en el ámbito del tratamiento *in situ* de alimentos con radiaciones, por ejemplo, a través del desarrollo de instrumentos y técnicas de dosimetría para haces de electrones de baja energía utilizados en alimentos específicos, en colaboración con asociados de la industria alimentaria.

Desarrollo de tratamientos genéricos

Durante los últimos 15 años, el número de productos alimenticios irradiados con fines de fitosanidad ha aumentado considerablemente hasta casi alcanzar 100 000 toneladas al año a nivel mundial. Sin embargo, los productos alimenticios irradiados que se comercializan son solo una pequeña parte de los que se tratan con otras medidas fitosanitarias. El número de mangos que se someten a tratamiento con agua caliente solo en México, por ejemplo, asciende a unas 300 000 toneladas al año, explica el Guy Hallman, experto en fitosanidad radicado en los Estados Unidos de América. "La irradiación fitosanitaria tiene más ventajas que otros tratamientos fitosanitarios como la aplicación de frío o calor y la fumigación, que pueden alterar el sabor o la textura de los

alimentos", indica el Sr. Hallman. La adopción de más normas aceptadas internacionalmente para la irradiación podría llevar a una mayor aceptación de este tipo de tratamiento y aumentar el comercio, agregó.

La Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), un tratado multilateral administrado por la FAO, establece normas para prevenir y controlar la propagación de plagas. El Sr. Blackburn dice que estas normas son la base de todos los acuerdos comerciales bilaterales aplicables a las frutas y verduras tratadas, pero en las normas sobre el tratamiento por irradiación solo se mencionan las dosis de radiación para especies específicas. Solo 2 de los 19 tratamientos por irradiación reconocidos por la CIPF son tratamientos genéricos que impiden que las moscas de la fruta puedan propagarse a través del comercio de productos frescos y reproducirse en nuevos lugares donde podrían ser devastadoras para la actividad agrícola y el medio ambiente.

En febrero de 2022, el OIEA puso en marcha un proyecto coordinado de investigación para abordar esta cuestión y desarrollar al menos cinco tratamientos fitosanitarios genéricos por irradiación para su adopción por la CIPF a fin de fomentar el uso comercial de la irradiación fitosanitaria. Estos nuevos tratamientos por irradiación genéricos podrían llegar a solucionar más del 90 % de los problemas de cuarentena que presentan las frutas y verduras que se comercializan, dice el Sr. Blackburn.

Empleo de la radiación para esterilizar productos sanitarios

Además de los usos en los ámbitos de la sanidad, la calidad de los alimentos y la fitosanidad, la tecnología de la radiación se ha utilizado con dosis mucho más elevadas para esterilizar productos destinados a la atención de salud desde el decenio de 1950. El tratamiento con radiación es parte del proceso de fabricación de casi la mitad de todos los productos de un solo uso en el ámbito médico como apósitos, guantes, batas, mascarillas, jeringas y otros equipos. La radioesterilización destruye los microorganismos contaminantes, al tiempo que conserva las propiedades y características del producto.

"Casi el 50 % de los productos médicos son esterilizados con las tecnologías de la radiación —rayos gamma, haces de electrones y rayos X— y es una tendencia que va en aumento", dice Celina Horak, Jefa de la Sección de Productos Radioisotópicos y Tecnología de la Radiación del OIEA. "Por otra parte, la radiación ionizante ha sido un instrumento eficaz y establecido para esterilizar equipos de protección individual (EPP), algo que ha tenido una fuerte demanda durante la pandemia de COVID-19".

En 2020, luego del comienzo de la pandemia, el OIEA estudió la viabilidad de esterilizar con radiación ionizante equipos médicos ya utilizados. El estudio concluyó que existe la posibilidad de reutilizar vestimenta de protección médica irradiada, a excepción de las mascarillas respiratorias como las N95 y FFP2. También determinó que las mascarillas usadas que habían sido irradiadas "mostraban una importante disminución de la eficiencia de filtración a nivel submicrónico". Es probable que esta disminución se deba a los cambios en las propiedades electrostáticas del filtro causados por la irradiación.

Neutrones para las neuronas y ciclotrones para los radioisótopos

Michael Amdi Madsen

El glioblastoma es un agresivo tumor maligno que representa alrededor del 15 % de todos los tumores cerebrales. Incluso si el cáncer está en un principio controlado mediante un tratamiento, casi siempre vuelve. Las intervenciones quirúrgicas y la radioterapia pueden prolongar algunos meses la supervivencia, pero, por lo general, el cáncer cerebral causa la muerte dentro del primer o segundo año desde el diagnóstico, y menos del 5 % de las personas sobreviven más de cinco años. Igual que el glioblastoma, muchos cánceres de cráneo son difíciles de tratar debido a la sensibilidad del tejido cerebral normal a las intervenciones quirúrgicas y la radioterapia. Sin embargo, cabe esperar que esto cambie pronto, en parte gracias a nuevas terapias facilitadas por aceleradores que producen fuentes intensas de neutrones.

“Si uno piensa en llevar a cabo una reacción nuclear, probablemente no imagine que la cabeza humana sea el lugar más indicado para hacerlo, pero se equivoca”, señala Ian Swainson, Físico Nuclear del OIEA que está ayudando a formular orientaciones del OIEA relativas a aplicaciones de los aceleradores para producir neutrones, por ejemplo, en el ámbito de la medicina. El Sr. Swainson afirma que la aplicación de esta tecnología resulta muy prometedora por lo que respecta a una terapia contra el cáncer concreta: la terapia por captura neutrónica en boro (BCNT). “En determinados cánceres de cabeza, cuello y cerebro, lanzar neutrones a los átomos de boro puede salvar vidas”.

La BCNT se vale del poder destructivo que pueden desatar los neutrones y se basa en localizar lo máximo posible el daño que se producirá en el tumor. Gracias a los isótopos de boro 10, es posible aprovechar la capacidad destructiva de los neutrones. “El boro 10 no es radiactivo, y es excelente capturando neutrones.

Así, en una reacción nuclear muy localizada, el boro se divide en dos fragmentos con energía. De ese modo, al inyectar a un paciente fármacos especiales que suministren boro 10 a los puntos donde se encuentre el tumor, estamos apuntando directamente contra el cáncer”, explica el Sr. Swainson.

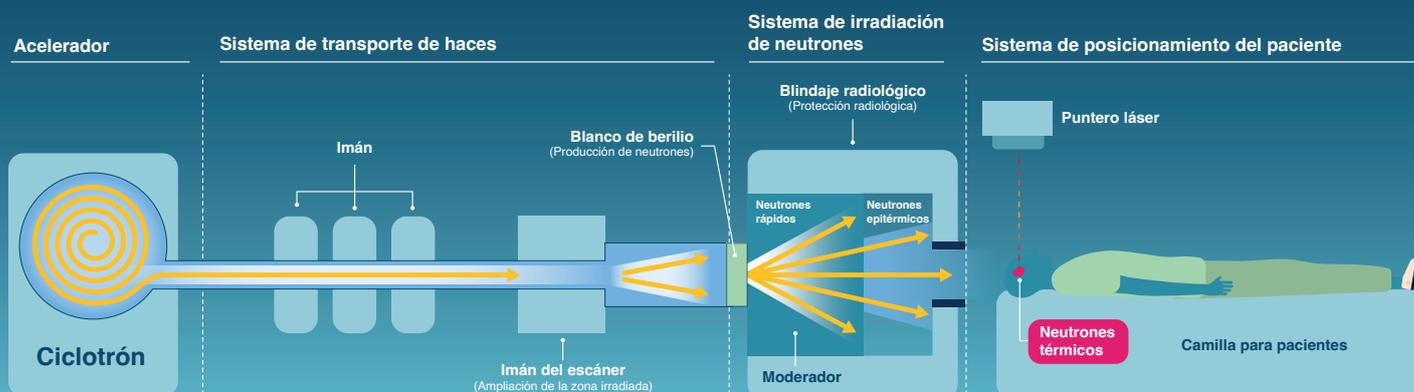
La disponibilidad de la BCNT, todavía en una fase en gran medida experimental, es limitada, pero la situación está cambiando. En 2020, se iniciaron tratamientos clínicos en dos instalaciones de BCNT situadas en Koriyama y Osaka (Japón). Ese mismo año, el OIEA y la Universidad de Okayama (Japón) acordaron cooperar más en relación con la BCNT organizando eventos, intercambiando conocimientos e información y desarrollando una base de datos de instalaciones de BCNT.

“La BCNT es una vanguardista terapia contra el cáncer —afirmó entonces Hirofumi Makino, Rector de la Universidad de Okayama—. Es la unión feliz de la física nuclear moderna y la biología celular farmacéutica más actualizada. Ahora bien, no hemos de olvidar el largo historial de dificultades en el desarrollo de esta complicada tecnología médica”.

En 2001, el OIEA preparó un informe técnico sobre la BCNT que se convirtió en una obra de referencia en la materia. En ese momento, las únicas fuentes de neutrones que se utilizaban eran los reactores de investigación. Desde entonces, se ha desarrollado una nueva generación de fuentes de neutrones basadas en aceleradores compactos, que se pueden instalar directamente en las clínicas. Esto hizo que el interés por la BCNT se reavivara notablemente.

También existen proyectos relacionados con la BCNT en la Argentina, China, Finlandia y la República de Corea. “Hace 20 años, tratar el cáncer con neutrones procedentes de aceleradores

Representación del sistema de BCNT clínicamente aprobado del Japón



(Gráficos: A. Vargas Terrones/OIEA)

solo era una teoría. Hoy es una realidad, y estamos dejando constancia de este avance en un documento técnico titulado *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*, que está por publicarse”, dice el Sr. Swainson.

La revolución de los ciclotrones

Para determinar la viabilidad de la BCNT en un paciente se le ha de inyectar un compuesto de boro radiomarcado con flúor 18 (^{18}F), producido con ciclotrones, y se le ha de someter después a imagenología sirviéndose de una técnica de medicina nuclear llamada tomografía por emisión de positrones-tomografía computarizada (PET-TC). El compuesto marcado con ^{18}F se denomina 4-borono-2- ^{18}F -fluoro-fenilalanina, o FBPA.

“El FBPA cumple una función importante, ya que confirma a los médicos que el tumor ha absorbido el compuesto con boro y está listo para la BCNT. Sin este paso, la terapia podría no funcionar. A medida que aumente la disponibilidad de la BCNT, necesitaremos que los ciclotrones sigan el ritmo de la demanda de FBPA”, declara Amirreza Jalilian, Químico del OIEA especializado en radioisótopos y radiofármacos. Un ciclotrón es un tipo de acelerador de partículas que, lanzando un haz de partículas a isótopos estables, produce radioisótopos utilizados en medicina nuclear. Esa interacción produce una reacción nuclear en la que se crean radioisótopos de período corto. Como estos decaen rápidamente, hay que producirlos cerca del lugar donde se llevará a cabo el tratamiento o directamente en él, y usarlos de inmediato.

El Sr. Jalilian observa que, si bien el número de reactores de investigación usados en la producción de radioisótopos es bastante estable, hay un auge mundial de ciclotrones nuevos, versátiles y cada vez más asequibles. Muchos de los

radioisótopos de período corto usados en pacientes pueden ser producidos por ciclotrones en hospitales, y he ahí una importante ventaja de esta tecnología.

La fluorodesoxiglucosa radiofarmacéutica es solo un ejemplo. Se basa en ^{18}F , que puede producirse con ciclotrones. Ese radiotrazador se utiliza en alrededor del 95 % de los procedimientos de PET-TC, y es por tanto crítico en la neuroimagenología y el diagnóstico del cáncer.

Otro peso pesado de los radiofármacos es el galio 68 (^{68}Ga), que es el componente clave de algunos radiofármacos teranósticos y un tipo de fármaco que utiliza radioisótopos tanto para el diagnóstico como para el tratamiento, liberando radiación en el proceso. Estos radiofármacos desempeñan un papel importante en el diagnóstico y el seguimiento de los cánceres, y son especialmente prometedores para el manejo del cáncer de próstata. Sin embargo, producir ^{68}Ga tiene sus dificultades.

“Hoy en día, el método más frecuente para producir ^{68}Ga es con un sistema sin acelerador llamado generador, pero los generadores son incapaces de producir lo suficiente para satisfacer la demanda. Los ciclotrones ofrecen un eficaz medio alternativo de producción directa y ya están ampliando en gran medida la disponibilidad de ^{68}Ga ”, dice el Sr. Jalilian, y explica que, en la actualidad, diez centros de todo el mundo utilizan de forma habitual ciclotrones para producir ^{68}Ga . El OIEA coordina actualmente un proyecto de investigación destinado a apoyar el intercambio de conocimientos especializados a escala internacional sobre la producción de ^{68}Ga basada en ciclotrones, y en 2019 presentó una publicación sobre el tema titulada *Gallium-68 Cyclotron Production*.

Átomos para sacar a la luz la verdad

Técnicas analíticas basadas en aceleradores detectan falsificaciones de obras de arte

Joanne Liou

El primer paso para conocer la historia que hay detrás de un cuadro suele ser identificar al artista y determinar cuándo se pintó. Y a decir verdad, hay pinturas supuestamente valiosas que cuentan una historia de engaño delictuoso. La falsificación de obras de arte puede ser lucrativa y pasar inadvertida, pero hay técnicas analíticas, como la datación por radiocarbono basada en la espectrometría de masas con aceleradores (AMS), que permiten detectar las imitaciones.

“Las técnicas analíticas nucleares son un poderosísimo medio para determinar la composición, el origen, la autenticidad y la antigüedad de muestras u objetos y, por ello, guardan relación directa con la criminalística —dice la Sra. Aliz Simon, Física Nuclear del OIEA—. En este contexto, las técnicas nucleares pueden ser instrumentos eficaces para diversos propósitos, como investigar falsificaciones de arte, detectar tanto el comercio ilícito como alimentos falsificados y medicamentos de calidad inferior a la norma, y analizar pruebas indiciarias (por ejemplo, fragmentos de vidrio del lugar donde se ha cometido un delito)”.

La criminalística es la aplicación de métodos científicos o conocimientos especializados para examinar pruebas que sirvan de apoyo en la investigación de delitos. Abarca diversas disciplinas que van desde los análisis de ADN y huellas dactilares hasta los análisis de vidrio y los relativos a la composición. En la esfera de la criminalística se utilizan aceleradores para analizar la composición, la estructura, la antigüedad y otras propiedades de un material. “Los rayos X, los neutrones y los iones presentan ventajas con respecto a métodos convencionales —afirma la Sra. Simon—. Permiten analizar una partícula entre millones y determinar su origen con gran exactitud, sin alterar las pruebas”.

Datación por radiocarbono

Todos los seres vivos, y por extensión el lienzo (de fibras naturales) o el marco (de madera) de un cuadro, absorben carbono de la atmósfera, incluido carbono 14, que es un isótopo inestable que se desintegra a una velocidad conocida. Cuando una planta o animal muere, deja de absorber carbono y el carbono radiactivo ya acumulado se desintegra. Es posible

determinar la antigüedad de un material a partir de la cantidad de carbono 14 presente, midiendo con AMS la proporción de los isótopos del carbono. Esta técnica, conocida como datación por radiocarbono, se utiliza mucho para datar fósiles y, desde hace poco, para datar presuntas falsificaciones de arte. “La datación por carbono 14 de lienzos determina la antigüedad máxima de una obra de arte atendiendo al tiempo transcurrido entre el cultivo del lino con que se fabricó el lienzo y el momento en que se pintó la obra”, señala la Sra. Lucile Beck, responsable del Laboratorio de Medición de Carbono 14 de la Universidad de París-Saclay en Francia.

La cantidad de carbono 14 en la atmósfera ha fluctuado en los últimos años, sobre todo desde mediados de la década de 1940 y 1950, como resultado de los ensayos de armas nucleares. La concentración de carbono 14 en la atmósfera alcanzó su máximo nivel en torno a 1964 y ha disminuido desde entonces. “Podemos determinar con facilidad los materiales que contienen radiocarbono reciente derivado de armas dado que sus concentraciones de carbono 14 superan los niveles anteriores a los años cincuenta”, explica la Sra. Beck.

Durante una investigación sobre posibles falsificaciones llevada a cabo en 2019 por la Oficina Central para la Lucha contra el Tráfico Ilícito de Bienes Culturales de Francia, la Sra. Beck realizó pruebas con dos cuadros de una colección que, según se creía, databa de finales del siglo XIX y principios del XX. El personal investigador reunió muestras de fibra de los lienzos y las redujo a aproximadamente un miligramo de carbono, que a continuación se midió con AMS.

“Gracias a la datación por radiocarbono con AMS, pudimos demostrar que dos cuadros (uno impresionista y otro puntillista) eran falsificaciones —concluyó la Sra. Beck—. Dado el exceso de carbono 14 detectado en las fibras, los cuadros no pudieron ser pintados a comienzos del siglo XX por los supuestos artistas, fallecidos en los años cuarenta, pues el contenido de las fibras reveló que los lienzos se habían fabricado a mediados de los años cincuenta o, más probablemente, después de 2000”. Los niveles de carbono 14 medidos se correspondían con los niveles previos y posteriores al máximo alcanzado en los años sesenta.

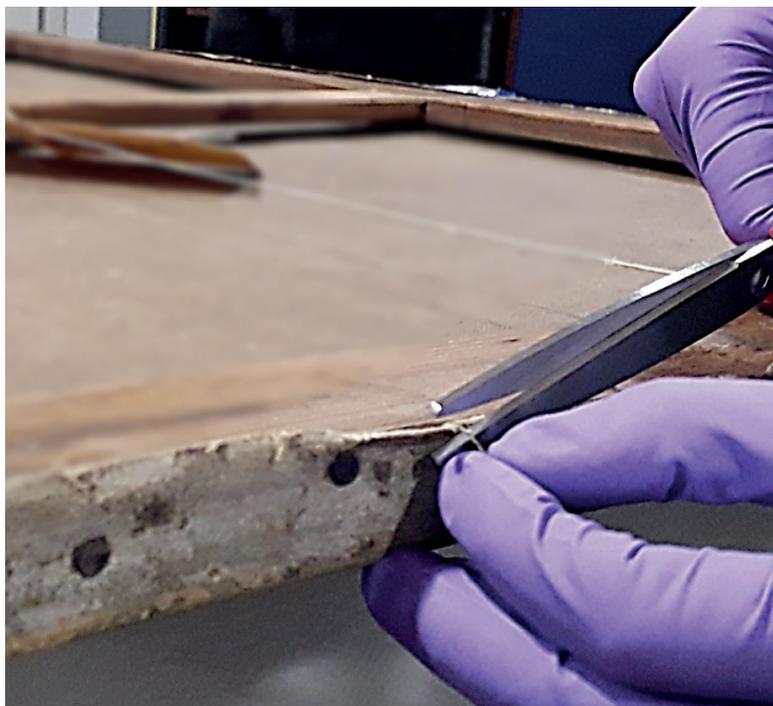
Fomento de técnicas nucleares en la criminalística

En 2017, el OIEA dio inicio a un proyecto coordinado de investigación de cuatro años de duración con el objetivo de mejorar las técnicas analíticas nucleares para responder a las necesidades de la criminalística. El proyecto se concentró en tres áreas principales: el análisis de vidrio, la autenticación de alimentos y el patrimonio cultural, incluida la investigación de falsificaciones en el mundo del arte. Los participantes del proyecto provenían del Brasil, Croacia, Eslovenia, Finlandia, Francia, Hungría, la India, Israel, Italia, Jamaica, Portugal, Singapur, Suiza y Viet Nam. Algunos resultados del proyecto, que abarcan desde el análisis de café hasta muestras de vidrios de parabrisas, así como el estudio de falsificaciones de obras de arte en Francia, ya están publicados en un número especial de la revista *Forensic Science International*.

En el marco del proyecto, el OIEA celebró en 2019 un taller junto con el Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam en Trieste (Italia). En él se hizo hincapié en cómo las técnicas basadas en aceleradores pueden complementar métodos habituales de la criminalística en la investigación de delitos. Al mismo tiempo, el OIEA también puso en marcha un curso de aprendizaje virtual sobre técnicas analíticas nucleares para la criminalística.

Aprovechando el éxito del proyecto, el OIEA firmó en 2021 un memorando de entendimiento con el Instituto Interregional de las Naciones Unidas para Investigaciones sobre la Delincuencia y la Justicia (UNICRI), a fin de fomentar la cooperación destinada a prevenir y combatir actividades delictivas mediante la ciencia y la tecnología nucleares.

El OIEA tiene previsto como próximo paso iniciar un proyecto coordinado de investigación, a modo de seguimiento, centrado en la detección del comercio ilícito de objetos de patrimonio y la extracción ilícita de metales preciosos.



Extracción de una fibra del lienzo de un supuesto cuadro impresionista para determinar si se trata de una obra falsificada.

(Fotografía: L. Beck/Universidad de París-Saclay)

Modificación cuántica

Uso de los aceleradores para implantar átomos individuales en la biodetección

Joanne Liou

En la última década, se ha hecho un uso intensivo de los aceleradores en el campo de la tecnología cuántica para modificar y caracterizar materiales. Las técnicas basadas en aceleradores utilizan iones de alta energía para alterar las estructuras atómicas de los materiales, lo que permite a los científicos controlar el comportamiento de átomos individuales. El uso principal de los aceleradores ha sido en la implantación iónica, que es una técnica ampliamente utilizada en la industria de los semiconductores y que existe desde hace ya décadas.

“Para los semiconductores, se implanta un gran número de iones a efectos de cambiar las propiedades eléctricas del silicio, por ejemplo”, explica el Sr. Andrew Bettioli, Profesor Titular de la Universidad Nacional de Singapur. “Para las tecnologías cuánticas, tenemos un objetivo muy diferente: queremos controlar los iones al nivel de los iones individuales. No implantamos millones ni miles de millones de iones; implantamos exactamente un solo ion”.

La dificultad que entraña la implantación de un ion es determinar cuándo, dónde y si, de hecho, el ion se implanta. “Y que el ion se implante en el material no quiere decir que funcione de la manera en que debería como cúbit o centro de color”, dice el Sr. Bettioli. Los cúbits, o bits cuánticos, son versiones complejas de los bits portadores de información utilizados en la informática convencional, y los centros de color son defectos que emiten luz para la detección cuántica.

En mayo de 2021, el OIEA acogió un taller de capacitación de cuatro días sobre el uso de los haces de iones en la ingeniería de materiales. En el taller, se brindó una introducción a la instrumentación de los haces de iones focalizados y a la detección de iones individuales. Más de 80 participantes, la mitad de ellos de países en desarrollo, asistieron al taller virtual, que se realizó en el marco de un proyecto coordinado de investigación y tenía como objetivo mejorar la comprensión del campo de la energía cuántica y captar el interés de países en fase de incorporación. El taller también coincidió con la inauguración del curso de aprendizaje electrónico del OIEA titulado Ion-beam Engineering of Materials for Quantum Technologies, que tiene como objetivo atraer a la próxima generación de expertos en energía cuántica.

“El OIEA ha ido a la vanguardia en la coordinación de la colaboración, la investigación y el desarrollo internacionales sobre las tecnologías cuánticas en consonancia con iniciativas nacionales e internacionales”, dice la Sra. Aliz Simon, Física Nuclear del OIEA cuya labor se centra en los aceleradores. “El OIEA continúa con sus iniciativas en investigación coordinada para aprovechar los beneficios de la energía cuántica para el bienestar común de la sociedad”. Un nuevo proyecto del OIEA, que se espera que dé comienzo a finales de este año, impulsará el desarrollo y la optimización de una plataforma para la biodetección basada en los centros de color de los diamantes, lo que permitiría la exploración de mecanismos subcelulares. En el campo cuántico, los diamantes se utilizan

como semiconductores para detectar secuencialmente campos eléctricos y magnéticos en células vivas individuales.

Centros de color para la detección cuántica

El diamante, en su forma más pura, es una red de átomos de carbono que tiene más de 500 defectos documentados que emiten luz. Uno de ellos es el centro de color nitrógeno-vacante (NV), el cual se produce cuando se quita un átomo de carbono para crear una vacante y un átomo de nitrógeno reemplaza un átomo de carbono adyacente. “Los centros de color NV pueden producirse naturalmente y se distribuyen aleatoriamente. Con los aceleradores, podemos crear artificialmente este defecto mediante implantación iónica en partes específicas dentro de los cristales de diamante a escala nanométrica”, dice el Sr. Bettioli. Entre los defectos conocidos del diamante, el centro NV puede insertarse en cristales de diamante a escala nanométrica, puede controlarse a temperatura ambiente y es biocompatible, es decir, no es perjudicial ni tóxico para los sistemas de vida.

Los centros NV de diamante tienen la capacidad de detectar campos magnéticos por medio de una técnica llamada resonancia magnética detectada ópticamente, u ODMR. La capacidad para obtener imágenes de campos magnéticos tiene implicaciones tanto en la biología como en la ciencia de los materiales. “Es una manera óptica de ver emisiones de luz y detectar campos magnéticos diminutos que se producen

en procesos biológicos”, explica el Sr. Bettioli. “Esta técnica de biodetección cuántica podría aplicarse para visualizar o medir procesos que operan a nivel celular y tienen un campo magnético muy pequeño, como los campos magnéticos que se producen cuando se activan neuronas en nuestros cerebros”.

La investigación actual del Sr. Bettioli aplica la técnica ODMR para detectar la malaria. “Los glóbulos rojos infectados con malaria tienen partículas magnéticas diminutas que pueden detectarse con ODMR —indica—. Todo lo que produzca un campo electromagnético podría detectarse con este método”.

El próximo proyecto del OIEA investigará más a fondo la detección cuántica mediante ODMR, al igual que la caracterización y la optimización de los dispositivos de detección. Además, este proyecto, que reunirá a investigadores que tienen en común el interés por la biodetección, surge a partir de un proyecto anterior de mayor alcance que tenía como objetivo mejorar los instrumentos de haces de iones basados en aceleradores. “El OIEA es un buen vehículo para la colaboración y ha creado una comunidad para que los expertos intercambien información y aprendan unos de otros”, señala el Sr. Bettioli.

Un nuevo proyecto del OIEA impulsará el desarrollo y la optimización de una plataforma para la biodetección que permitirá la exploración de mecanismos subcelulares.

(Fotografía: Adobe Stock)

Técnicas nucleares para el desarrollo de materiales avanzados

Anass Tarhi

Desde el uso de nanocompuestos enriquecidos con aceites esenciales para el envasado activo de alimentos hasta el injerto de polímeros superabsorbentes mediante radiación, los materiales avanzados en cuyo procesamiento interviene la radiación desempeñan una función cada vez más importante en la reducción de los desechos alimentarios, el perfeccionamiento del rendimiento agrícola y la mejora de la asistencia médica, entre muchas otras aplicaciones.

Además de ser livianos y de fácil fabricación, los materiales avanzados modificados mediante técnicas nucleares ofrecen mejor rendimiento y mayor durabilidad. Las tecnologías de la radiación, entre ellas, los aceleradores, han consolidado su lugar, y contribuyen al desarrollo sostenible gracias a sus tantas aplicaciones.

Usos de los materiales avanzados

Hay varios procesos asistidos por radiación que ya cuentan con una aplicación consolidada en la industria, ya sea para crear materiales avanzados o mejorar la producción de materiales de alto rendimiento. Ejemplo de ello son los plásticos o los cauchos, que mejoran sus prestaciones al exponerlos a la radiación; eso permite fabricar tubos de plástico resistentes al calor y a la presión que se utilizarán en los sistemas de circulación de agua y de líquidos térmicos de los edificios.

“Los materiales de alto rendimiento producidos mediante radiación se encuentran por doquier y en todo tipo de productos”, dice la Sra. Celina Horak, Jefa de la Sección de Productos Radioisotópicos y Tecnología de la Radiación del OIEA. “Los podemos encontrar en objetos cotidianos que ahora son más resistentes y seguros, y algunos de esos materiales incluso permiten que podamos tener un estilo de vida más sostenible”.

También se aplican tratamientos con radiaciones para secar o endurecer pinturas, tintas y revestimientos sin disolventes, y para mejorar la robustez, la resistencia a la temperatura y la impermeabilidad de materiales de embalaje de origen biológico y biodegradables. En varios países, se están utilizando cerámicas porosas con nanopartículas de plata generadas *in situ* para purificar el agua en comunidades rurales.

Los beneficios de los materiales avanzados en el contexto del cambio climático

Satisfacer la creciente demanda de energía a la vez que se aborda el cambio climático requiere seguir avanzando en la producción, el almacenamiento y el reciclado de energía renovable. “Las tecnologías de la radiación son particularmente adecuadas para la fabricación de membranas específicas y de los materiales compuestos a granel que se utilizarán en la tecnología de pila de combustible, lo que tiene como objetivo producir energía renovable de una forma más eficiente”, dice el Sr. Xavier Coqueret, profesor de la Universidad de Reims Champagne-Ardenne. Indica, además, que el pretratamiento mediante radiación puede utilizarse para mejorar la biomasa lignocelulósica o para la conversión de la energía de la luz solar con paneles fotovoltaicos avanzados.

Abordar la carga global de los residuos plásticos, otra cuestión ambiental, requiere, según comenta el Sr. Coqueret, métodos eficientes de reciclado mediante radiación que permiten diseñar plásticos avanzados y productos de materiales compuestos que, con otros métodos convencionales, no serían reutilizables (véase la página 10).

El efecto de la radiación en los materiales avanzados

Los materiales resistentes, sólidos y duraderos son vitales en la industria en general, pero son especialmente importantes en el sector nuclear, donde la seguridad tecnológica de los reactores y la viabilidad de las operaciones del ciclo del combustible nuclear dependen de los materiales utilizados. En el caso de los materiales de los reactores nucleares, los dos mayores desafíos son el calor, del que se ocupan los sistemas de refrigeración, y la radiación.

“Los materiales estructurales que se utilizan dentro de los reactores nucleares están expuestos a daños causados por los neutrones rápidos que desplazan a los átomos y crean hidrógeno o helio en estado gaseoso. En última instancia, esto podría causar dilatación, crear vacíos y dar lugar a otros varios cambios estructurales y mecánicos que limitan la vida útil final del servicio”, dice el Sr. Ian Swainson, Físico Nuclear del OIEA. “Es vital, por lo tanto, someter a los materiales a pruebas de radiación, y los aceleradores pueden ampliar la disponibilidad de estas pruebas”.

Las partículas cargadas pierden la mayoría de su energía hacia el final de su recorrido por los materiales, lo que causa un daño importante, aunque localizado. Por esta razón, los investigadores tienen previsto evaluar materiales que puedan utilizarse en futuros reactores nucleares mediante partículas cargadas en aceleradores de haces de iones.

“Poner los materiales a prueba con un acelerador es más rápido que con un reactor”, dice el Sr. Swainson, quien explica que lo que con un reactor de pruebas de

alto flujo llevaría un año podría hacerse en un día con un acelerador. Por lo general, las muestras no adquieren radioactividad, y las zonas afectadas se pueden seccionar y examinar detenidamente con técnicas de microscopía.

En 2016, el Sr. Swainson ayudó a organizar un proyecto coordinado de investigación del OIEA de 5 años de duración en el que se distribuyeron muestras de un mismo material a instalaciones con múltiples aceleradores para que las irradiasen en condiciones idénticas, y también se remitieron al reactor de investigación rápido BOR-60 de la Federación de Rusia para comparar los resultados. El análisis tras la irradiación contribuirá a mejorar la reproducibilidad entre las instalaciones de aceleradores de distintos emplazamientos y aportará información sobre la eficiencia con la que los aceleradores permiten descartar los materiales de bajo rendimiento.

En agosto de 2022, el OIEA celebrará la Segunda Conferencia Internacional sobre las Aplicaciones de la Ciencia y la Tecnología de la Radiación (ICARST-2022), cuyo objetivo es explorar estas cuestiones y destacar las aplicaciones y los progresos en materia de radiación ionizante. Entre otros temas, la Conferencia centrará la atención en los avances y las limitaciones tecnológicas y económicas existentes en esferas específicas de los materiales avanzados, y contribuirá a examinar los logros alcanzados en los procesos de radiación de uso consolidado para la mejora del rendimiento de los materiales.

Los elementos de las barras utilizadas en los reactores nucleares están hechos de materiales avanzados y deben ser resistentes al calor y a la radiación.

(Fotografía: Adobe Stock)



Nuevas instalaciones de radiación ionizante en Filipinas y otros lugares del mundo

Puja Daya

El cáncer es la segunda causa de muertes en Filipinas, según el perfil nacional de 2020 del Observatorio Mundial del Cáncer. Cada año fallecen casi 100 000 personas por causas relacionadas con esta enfermedad y, para reducir esta cifra, la detección temprana de tumores es de suma importancia. Sin embargo, las exploraciones por imagenología médica cuestan una media de casi 2000 dólares y muchas personas de Filipinas ni siquiera pueden costearse la prueba.

“La falta de recursos para poner en marcha programas para la detección del cáncer y mantenerlos es un grave problema en Filipinas, lo que provoca que muchos enfermos de cáncer no reciban ni diagnóstico ni tratamiento”, dice el Sr. Carlos Arcilla, Director del Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares. El Sr. Arcilla y su equipo esperan hacer frente a esta escasez de capacidades a través de la inauguración en Manila de un nuevo ciclotrón, un tipo de instalación de radiación ionizante, cuyo objetivo será producir radiofármacos esenciales para diagnosticar y tratar el cáncer, así como enfermedades cerebrales y cardiovasculares.

Actualmente Filipinas solo tiene cuatro ciclotrones, pero todos son de propiedad privada y el país cuenta con pocas instalaciones de exploración con tomografías por emisión de positrones-tomografías computarizadas (PET-TC), lo que comporta que solo el cinco por ciento de enfermos de cáncer puedan recibir diagnóstico. Los ciclotrones son aceleradores que producen los radiofármacos que se administran a los pacientes antes de una PET-TC. Esta prueba consiste en una exploración médica que crea imágenes tridimensionales de alta calidad, comúnmente de órganos y tejidos, y que permite detectar enfermedades y visualizar tumores. Gracias al nuevo ciclotrón, Filipinas podrá producir más radiofármacos a nivel nacional para aumentar el acceso a las PET-TC.

Con un ciclotrón y un escáner de PET-TC públicos, el nuevo Centro de Investigación e Innovación en Medicina Nuclear podrá ofrecer una estadificación del cáncer precisa a unos 5000 pacientes más por año.

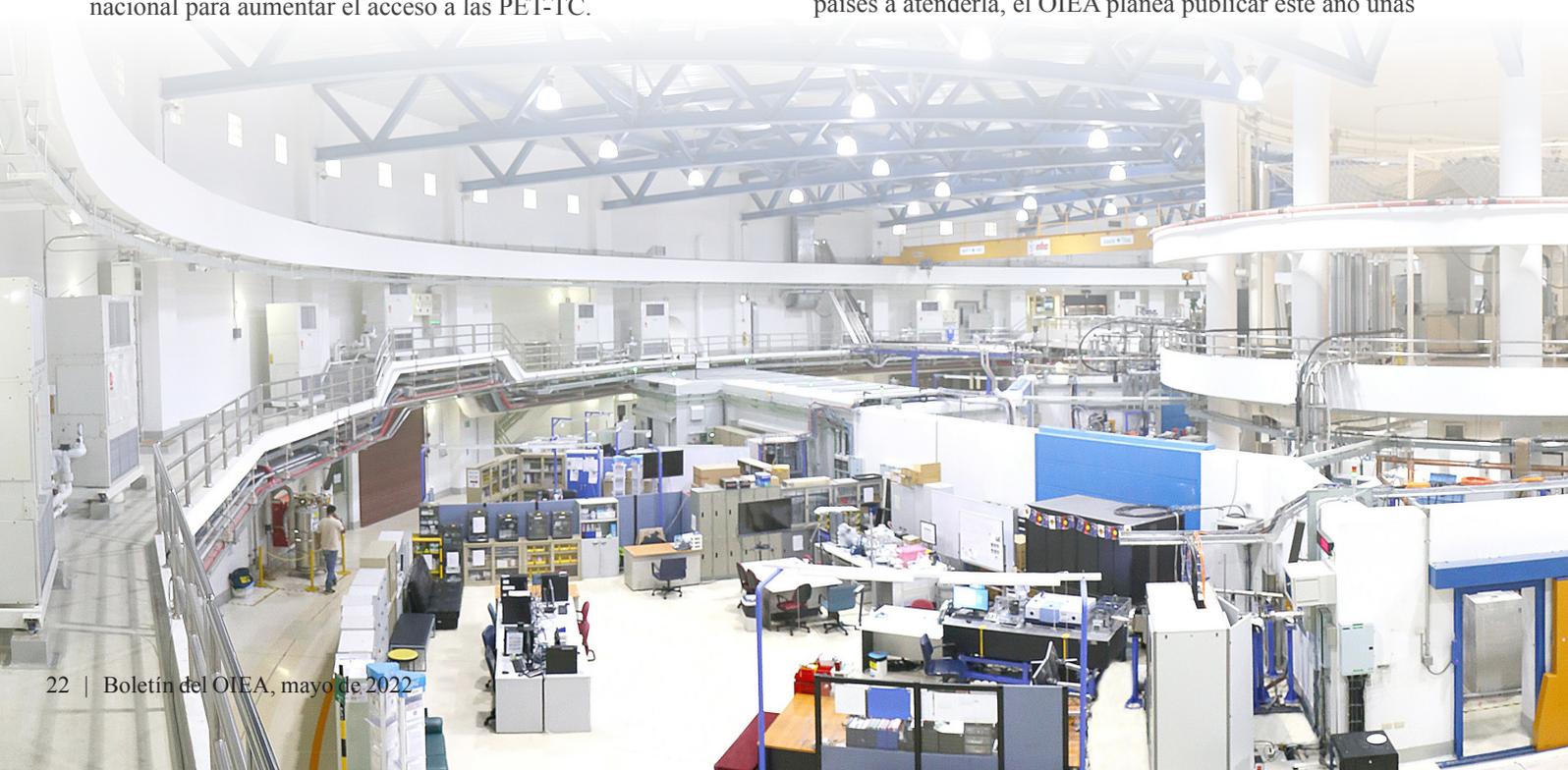
“Nuestro objetivo es producir radiofármacos tanto para el Centro como para el Hospital General de Filipinas, situado en la cercana localidad de Diliman. Esto nos permitirá atender a más pacientes y servir de herramienta para la investigación sobre el cáncer”, indica el Sr. Arcilla, quien agrega que el Centro también será un nodo para la capacitación de la región, para que Filipinas y los países vecinos puedan volverse autosuficientes en la producción y empleo de radiofármacos.

Los beneficios de establecer instalaciones de radiación ionizante

Los radioisótopos y haces de partículas que se producen en las instalaciones de radiación ionizante, como son los ciclotrones, los sincrotrones y otros tipos de aceleradores, tienen aplicaciones en medicina y atención médica, seguridad hídrica, alimentación y agricultura, investigación, abastecimiento de energía, productos industriales y de consumo, investigaciones en criminología y conservación del patrimonio cultural.

El establecimiento de más instalaciones para el uso de aceleradores en todo el mundo se traducirá en un acceso mejor y más económico a estos beneficios. Por ello, paralelamente a la de Filipinas, se inaugurarán nuevas instalaciones en la Argentina, Malasia y Tailandia, todas con el apoyo del OIEA.

A nivel mundial, la demanda de este tipo de instalaciones de radiación ionizante va en aumento y, para ayudar a los países a atenderla, el OIEA planea publicar este año unas



orientaciones para el establecimiento de instalaciones de radiación ionizante. “A quienes participan en la proyección de instalaciones de radiación ionizante les puede ser útil disponer de unas orientaciones que les permitirán emprender el proyecto de manera organizada, lo que los ayudará a progresar satisfactoriamente en su puesta en marcha y plena explotación, cuando la instalación comience a funcionar y a prestar servicios. Esto es lo que hará esta publicación, recopilando las recomendaciones de expertos sobre cómo poner en marcha nuevas instalaciones y mejorar las que ya existen”, comenta el Sr. Nuno Pessoa Barradas, el especialista en reactores de investigación del OIEA responsable de la publicación.

Las instalaciones de radiación ionizante pueden contener diferentes tipos de equipo para la ionización. En Tailandia, el Instituto de Investigación de Luz de Sincrotrón planea construir un segundo sincrotrón. El primero del país (véase la imagen) ha estado 20 años en funcionamiento y ha ayudado a los expertos tailandeses a utilizar la radiación ionizante de manera sostenible para conservar bienes del patrimonio cultural (véase la página 8), llevar adelante investigaciones criminológicas (véase la página 16) y contribuir a la investigación y el desarrollo.

“El aparato disponible ha tenido grandes resultados en el país”, explica el Sr. Supargorn Rugmai, Subdirector de Asuntos Académicos y Jefe de la División de Instalaciones para la Investigación en el Instituto de Investigación de Luz de Sincrotrón. “Al comienzo, faltaban conocimientos, pero, con los programas de capacitación que estamos implantando en la región, nos estamos convirtiendo en expertos. Con la nueva instalación, podremos abrir nuestro alcance a más ámbitos y aportar mayor valor a la sociedad”.

Las fuentes de radiación de sincrotrón permiten construir y promover la investigación industrial, médica y básica. El nuevo sincrotrón de Tailandia multiplicará por 2,5 la energía que producía el sincrotrón anterior. Se utilizará para impulsar investigaciones científicas y mejorará la economía del país al permitir el uso de rayos X de alta intensidad en la mejora e innovación de productos industriales.

Expertos de la Argentina y Malasia también están construyendo nuevas instalaciones de aceleradores de haces de electrones, que permitirán una mayor producción de radioisótopos para diagnósticos y tratamientos médicos, a la vez que propiciarán la investigación y la tecnología en estos países.

A través de su programa de cooperación técnica, el OIEA envía expertos a la Argentina, Filipinas, Malasia, Tailandia y otros países para ayudar a poner en marcha y mantener en condiciones de seguridad las instalaciones de radiación ionizante, con la capacitación de expertos locales, que podrán así encargarse de la explotación y el mantenimiento de estas instalaciones de manera independiente. Junto con este apoyo, el OIEA también publica normas de seguridad, proporciona sesiones virtuales y alberga una plataforma de aprendizaje electrónico llamada Portal de Conocimientos sobre Aceleradores, un sitio para y por la comunidad que trabaja con aceleradores y que proporciona materiales de capacitación e información sobre aceleradores en todo el mundo, entre muchos otros recursos.

El sincrotrón de la Universidad Tecnológica de Suranaree (Tailandia) tiene aplicaciones en los sectores agrícola, médico, farmacéutico e industrial.

(Fotografía: Instituto de Investigación Luz de Sincrotrón)



Legislar en pro de los usos pacíficos y tecnológica y físicamente seguros de las instalaciones de irradiación

Anthony Wetherall y Chenchen Liang

Los usos de la tecnología nuclear en condiciones pacíficas y tecnológica y físicamente seguras prometen importantes beneficios para la sociedad, pero las radiaciones ionizantes, que son esenciales para tantas de sus aplicaciones, pueden acarrear serios riesgos para la salud de las personas y para el medio ambiente. Para reducir al mínimo estos riesgos, se necesitan unas disposiciones jurídicas bien articuladas que dicten cómo se evaluará, gestionará y controlará esta radiación.

Las instalaciones de radiación ionizante (IRF), que son importantes en muchos ámbitos que llevan aparejado el uso de la tecnología nuclear (véase la página 22), no plantean riesgos radiológicos comparables a los de las centrales nucleares, por lo que no están sujetas a los mismos requisitos de seguridad radiológica, física y nuclear que los reactores. Las IRF y las actividades correspondientes deben estar sujetas a normas de seguridad que sean coherentes con un enfoque graduado. Es decir, los órganos reguladores deben autorizar, regular e inspeccionar estas instalaciones.

Los Estados tienen la responsabilidad fundamental de establecer, mantener y reforzar marcos jurídicos nacionales integrales, entre ellos, los marcos reguladores. En muchos países, la jerarquía jurídica sitúa a los instrumentos constitucionales en el nivel superior, seguidos por un marco legislativo de normas escritas que conforman las leyes promulgadas.

Este marco proporciona la base jurídica para la aplicación de los instrumentos internacionales jurídicamente vinculantes y no vinculantes, como la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos, el Código de Conducta sobre Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas, así como las normas de seguridad pertinentes y las orientaciones sobre seguridad física nuclear del OIEA.

El marco legislativo es la base de todo sistema de control reglamentario y dispone la creación o designación de un órgano regulador con la independencia y los recursos humanos y financieros necesarios. Además, le atribuye un conjunto de funciones claramente definidas, entre ellas, dictar las normas y asegurar su cumplimiento, conceder autorizaciones y realizar inspecciones, así como delimitar y coordinar de manera clara las responsabilidades. Este marco legislativo es vital para el uso pacífico y tecnológica y físicamente seguro de la radiación ionizante y, para establecerlo, los países esperan recibir el apoyo del OIEA.

No siempre es fácil legislar

A lo largo de los años, los gobiernos nacionales han solicitado ayuda para establecer o reforzar sus marcos jurídicos nacionales en materia de tecnología nuclear. “La experiencia nos demuestra que elaborar la legislación nuclear no siempre es una tarea fácil”, dice el Sr. Wolfram Tonhauser, Jefe de la Sección de Derecho Nuclear y de los Tratados del OIEA. “Deben abordarse las tres esferas técnicas principales (la seguridad tecnológica, la seguridad física y las salvaguardias) de una forma adecuada e integral”.

Además, las legislaciones nucleares nacionales deben cumplir con los requisitos constitucionales e institucionales del ordenamiento jurídico de cada país y, al mismo tiempo, deben buscar el mayor grado posible de armonización y coherencia con los marcos legislativos de otros países en el ámbito nuclear.

Es importante que los responsables de la formulación de políticas y de la toma de decisiones reconozcan el carácter especial de la tecnología nuclear y de sus aplicaciones, sobre todo, por sus posibles repercusiones en asuntos políticos o de carácter reservado o estratégico, así como por los riesgos que pueden entrañar para la seguridad física y que son de interés nacional, internacional y regional. Además, los legisladores deben apreciar la dimensión intersectorial de las tecnologías nucleares y de las instalaciones y actividades conexas, que pueden abarcar múltiples sectores y ámbitos, como la salud, la energía, la industria, el transporte, el agua, la alimentación y la agricultura.

Como tal, la elaboración de leyes da lugar a la necesidad de evaluar de forma exhaustiva las diversas políticas, leyes y marcos reguladores y dispositivos en vigor que sean pertinentes. A menudo, es necesario introducir cambios importantes o complejos en las políticas existentes, lo que implica cuestiones de envergadura en materia de reglamentación interinstitucional. Para muchos legisladores, la energía nuclear es un campo muy especializado, complejo y técnico, lo que con frecuencia lleva al uso de terminología y definiciones técnicas en la legislación nacional.

Con el objetivo de hacer frente a estos y otros retos, el programa de asistencia legislativa del OIEA presta apoyo a las autoridades nacionales. Se lleva a cabo en el marco del programa de cooperación técnica del OIEA a fin de dar a conocer el derecho nuclear y capacitar en la materia, de modo que se elaboren normas de seguridad física y tecnológica, entre

ellas, las relativas a las instalaciones de radiación ionizante, a la concesión de licencias para su explotación, la elaboración de sus reglamentos y la realización de las inspecciones pertinentes.

El apoyo del OIEA es pluridimensional e incluye la celebración de reuniones con los responsables de la toma de decisiones y de la formulación de políticas, los altos funcionarios y los legisladores (como los parlamentarios), así como la realización de talleres nacionales, subregionales y regionales para un amplio abanico de funcionarios, y el examen de los textos de la legislación nuclear proyectada o ya promulgada. El programa, además, organiza sesiones de formación para crear capacidad, como, por ejemplo, las celebradas en el Instituto de Derecho Nuclear, que ofrece un programa anual de capacitación en derecho nuclear de dos semanas de duración dedicado a la redacción de leyes, el cual está organizado por el OIEA. Solo en la última década, son

más de 500 los funcionarios que han recibido capacitación en el Instituto de Derecho Nuclear, en el que se han llevado a cabo más de 200 actividades bilaterales de redacción legislativa, al tiempo que se celebraban 53 talleres nacionales y otros 18 de carácter regional y subregional.

Más recientemente, los seminarios web sobre el derecho nuclear han impulsado el diálogo con los Estados Miembros sobre esta materia. Durante los últimos diez años, más de 10 países de Asia y el Pacífico, 10 de Europa y más de 20 de África han aprobado o modificado legislación para cuya redacción han recurrido a la ayuda del OIEA. Brunei Darussalam y Filipinas, con ciclotrones recién instalados, y Jordania, que cuenta con aceleradores, son algunos ejemplos de países que se benefician de esta asistencia. Por último, los manuales de derecho nuclear del OIEA, en particular, el *Manual de derecho nuclear: legislación de aplicación*, siguen siendo las publicaciones de referencia en este ámbito.

Solo en la última década, son más de 500 los funcionarios que han recibido capacitación en el Instituto de Derecho Nuclear.

(Fotografía: D. Calma/OIEA)



Lo que hay que saber sobre los haces de iones

Puja Daya y Sotirios Charisopoulos

Ya sea para determinar el origen de contaminantes, caracterizar contaminantes presentes en los alimentos, obtener imágenes de células biológicas individuales o determinar la antigüedad de objetos históricos, los científicos utilizan los haces de iones para darnos respuestas. Pero, ¿qué son y cómo se utilizan?

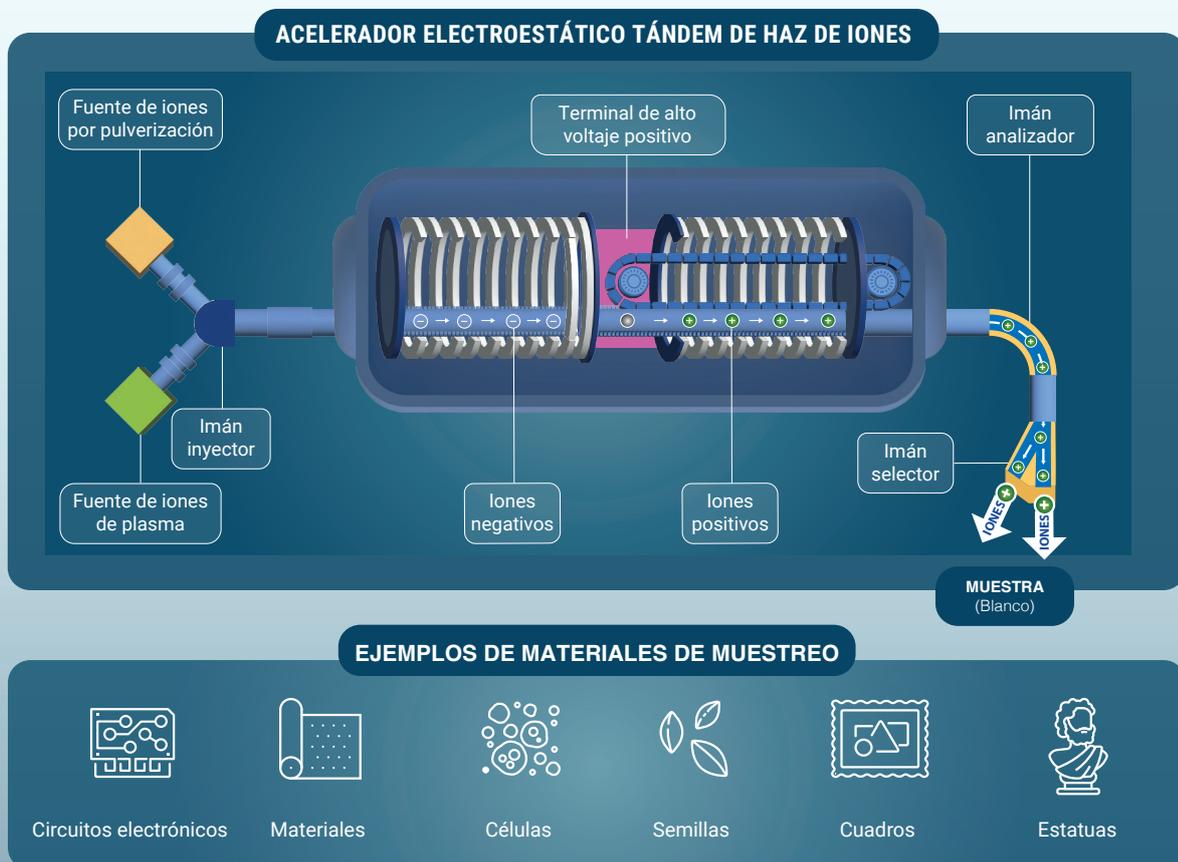
Como su nombre indica, los haces de iones son corrientes de átomos cargados eléctricamente. Los iones de un haz se producen mediante unos instrumentos especiales llamados fuentes de iones. Estos adquieren velocidad al entrar en un campo eléctrico, que se genera en un acelerador de partículas, y campos magnéticos los dirigen y centran para que tracen trayectorias paralelas en un vacío dentro de un tubo metálico. En función del tipo de acelerador, es posible acelerar los haces de iones a una velocidad cercana a la de la luz.

En el caso de los aceleradores electroestáticos tándem (véase el gráfico), los haces de iones son bombardeados en una muestra de material o un objeto. La interacción con el material puede hacer que los iones del haz cambien de dirección, o la colisión puede provocar que se liberen partículas o radiación, principalmente en forma de rayos X o rayos gamma, radiación que es posible detectar y analizar.

Las propiedades de la energía y de la radiación emitida revelan detalles sobre la composición de la muestra bombardeada, por ejemplo, si es cristalina o no, su dureza y propiedades físicas que son de interés para las tecnologías emergentes. Asimismo, los materiales de muestra u objetos bombardeados pueden variar en cuanto a forma y fase de la materia, y pueden ser láminas; pequeñas pastillas de suelo; células humanas, animales o vegetales; semillas; rocas; líquidos o incluso bienes históricos o estatuas. Dependiendo de la forma y composición del material, el bombardeo puede producirse en un vacío o en aire.

Gracias a sus capacidades únicas de análisis y modificación, los haces de iones acelerados se usan en muchas aplicaciones. En el fitomejoramiento por inducción de mutaciones, se utilizan para irradiar material vegetal o plántulas con el fin de acelerar su proceso de evolución natural induciendo mutaciones, a efectos de conseguir que los cultivos tengan mayor rendimiento o sean resistentes a enfermedades y sequías.

Los protones y otros iones se utilizan mucho para producir los radioisótopos necesarios para crear radiofármacos destinados al diagnóstico y el tratamiento del cáncer. En la terapia



oncológica se utilizan haces de protones y de iones de carbono para bombardear tumores cancerosos, especialmente cuando no es posible administrar otra terapia. Estos haces suministran energía a un tumor para calentarlo y desintegrarlo.

Con el aumento de la demanda de materiales más fuertes y mejores, también se utilizan diversos haces de iones para modificar las propiedades de los materiales y, así, reforzar su resistencia. Un ejemplo de ello son los vehículos espaciales o los reactores de fusión, que precisan materiales que les permitan operar en entornos con altos niveles de radiación.

Haces de electrones

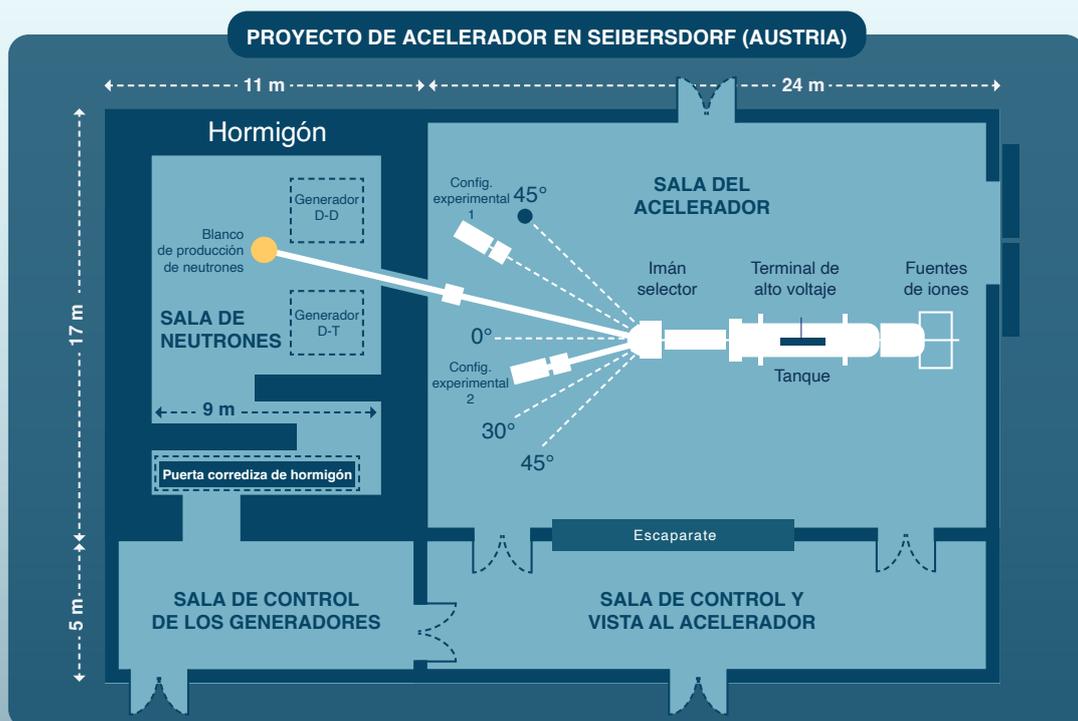
De manera similar a los haces de iones, los haces de electrones son una corriente de electrones generada por fuentes de electrones en diversos tipos de aceleradores. Se utilizan para producir rayos X, que se aplican en los tratamientos médicos para irradiar y destruir células cancerosas. Los haces de electrones o los rayos X también se emplean para irradiar alimentos y destruir bacterias peligrosas sin degradar su valor nutricional, su calidad ni su sabor.

Proyecto futuro de una instalación de haz de iones del OIEA

Los países de todo el mundo pueden sacar provecho de los haces de iones y electrones, y el OIEA planea crear su propia instalación de haz de iones (IBF) tándem de última generación en Seibersdorf (Austria). Con este acelerador, el OIEA prestará apoyo a las actividades de investigación y ayudará a formar y capacitar a científicos de todo el mundo sobre las diversas aplicaciones de los haces de iones, entre ellas, la producción de partículas secundarias como los neutrones.

“Los haces de partículas son sondas excepcionales que pueden utilizarse no solo para comprender mejor el universo, sino también para analizar y aprovechar los procesos físicos capaces de mejorar la vida y sostener el crecimiento económico —señala Danas Ridikas, Jefe de la Sección de Física del OIEA—. Los aceleradores de partículas son inversiones rentables que contribuyen a lograr un desarrollo sostenible.” Con el nuevo acelerador de haces de iones tándem, el OIEA podrá prestar más ayuda a los países para que refuercen sus capacidades en tecnologías de aceleradores y sus aplicaciones”.

Para que el proyecto de la IBF pueda albergar el acelerador tándem, la infraestructura necesaria y la instrumentación conexas, al igual que los recursos para su funcionamiento, el OIEA busca recaudar aproximadamente 4,6 millones de euros.



(Gráficos: A. Vargas Terrones/OIEA)

Irradiación industrial para un mundo mejor

Michael Amdi Madsen

Aunque hay quien entra en pánico al oír la palabra “radiación”, la irradiación ha desempeñado un papel invisible, beneficioso y a menudo vital en la industria y la inocuidad de los alimentos durante más de 100 años. Ya sea aplicada a la esterilización de dispositivos médicos, a la desinfección de productos frescos o al refuerzo de polímeros industriales, las tecnologías de irradiación son una parte esencial del mundo moderno.

Para comprender mejor la importancia de la irradiación industrial y conocer la evolución de sus tecnologías, hablamos con el Sr. Paul Wynne, Presidente y Director General de la Asociación Internacional de Irradiación (IIA).

La IIA es una organización sin fines de lucro formada por empresas, institutos de investigación, universidades y organismos gubernamentales de todo el mundo, que presta apoyo a la industria de la irradiación y la comunidad científica en todo el mundo.



P: ¿Dónde ha tenido más repercusión la irradiación industrial basada en aceleradores y hacia dónde cree que se dirige esta tecnología?

R: Los aceleradores se utilizan en el ámbito industrial para mejorar las propiedades de los polímeros desde hace unos 60 años. Una de las principales aplicaciones es el tratamiento de los aislantes de los cables para aumentar su resistencia a las altas temperaturas, lo que contribuye a la seguridad contra incendios y la durabilidad de los equipos. Existen muchas otras aplicaciones basadas en otras modificaciones químicas inducidas por haces de electrones, como la creación de compuestos de madera y plástico para pisos o la fabricación de las espumas utilizadas en la industria automotora. Muchas de estas aplicaciones están patentadas y se aplican en centros de fabricación.

La llegada de los aceleradores de alta potencia amplió la gama de productos que podían procesarse, lo que hizo posible que la tecnología compitiera con la irradiación gamma emitida por el radioisótopo cobalto 60. Entre los nuevos productos que podrían tratarse están la esterilización de dispositivos médicos y envases, ingredientes farmacéuticos y cosméticos, así como el control microbiano de los alimentos. Sin embargo, la irradiación gamma ha seguido predominando en estas aplicaciones hasta la fecha.

P: ¿Existe un cambio de la irradiación con fuentes radioactivas hacia las tecnologías basadas en aceleradores?

R: Hay un elemento que motiva este cambio y que principalmente tiene que ver con la esterilización de dispositivos médicos. La demanda de estos dispositivos, y por lo tanto de su esterilización, está aumentando a gran velocidad. La irradiación es el método preferido para un poco menos de la mitad de todos los dispositivos que requieren esterilización a escala mundial. En más del 80 % de estos casos se utiliza la esterilización gamma. Diversas circunstancias, algunas de las cuales podrían ser temporales, han impedido en los últimos tiempos que la oferta de cobalto 60 siga el ritmo del aumento de la demanda. Los fabricantes de dispositivos médicos no suelen tener preferencia por un método u otro, simplemente quieren que sus productos estén bien esterilizados.

La esterilización gamma a partir de fuentes de cobalto 60 tiene dos grandes virtudes: su sencillez y fiabilidad. Los aceleradores también tienen ventajas: solo se necesita electricidad para que funcionen y se puede detener la emisión de radiación ionizante. Las fuerzas del mercado decidirán cuál de estas tecnologías predominará en el futuro, pero, por el momento, es importante que todas ellas sigan estando disponibles porque todas son necesarias para satisfacer la demanda de esterilización.

Cabe señalar que, en términos de capacidad de tratamiento, todo lo que se puede tratar con los aceleradores de electrones puede tratarse también con radiación gamma, pero no al revés. Sin embargo, algunos aceleradores pueden estar equipados con un blanco metálico que convierte el haz de electrones en rayos X, que tienen características similares a la radiación gamma.

P: La demanda de aplicaciones industriales basadas en aceleradores está creciendo, especialmente en los países en desarrollo. ¿Qué desafíos deben superar estas tecnologías para que sean más accesibles?

R: Es probable que en el futuro los aceleradores absorban gran parte del crecimiento del mercado de la irradiación gamma tradicional. Aunque el número de proveedores de aceleradores supera el de proveedores de cobalto 60, sigue siendo de una docena más o menos en el caso de las máquinas de alta energía y de alta potencia, y muy inferior para los aceleradores con capacidad de rayos X. El desarrollo de sistemas de rayos X sigue siendo limitado, pero está creciendo rápidamente partiendo de un nivel bajo.

En muchos países en desarrollo no se han adoptado todavía los aceleradores de forma significativa debido principalmente a la elevada inversión necesaria, la complejidad de los aparatos en comparación con los irradiadores gamma y la falta de disponibilidad de un suministro eléctrico abundante y estable. Los recursos humanos, las limitaciones financieras y el cumplimiento de los requisitos de seguridad son obstáculos que probablemente podrían superarse con mayor facilidad que los problemas relacionados con la infraestructura y el tamaño del mercado. Por el momento, no parece que la tecnología basada en aceleradores sea adecuada para todos los países en desarrollo.

P: La IIA y el OIEA colaboran en diferentes iniciativas, por ejemplo, en conferencias y talleres internacionales para jóvenes investigadores. ¿Cómo contribuye esto a aumentar el uso de la tecnología de aceleradores?

R: Los objetivos de la asociación coinciden con algunos de los del OIEA. En cuanto a la promoción de los usos seguros y beneficiosos de las tecnologías de la radiación, la IIA es tecnológicamente neutral. Mientras que las contrapartes del OIEA son los gobiernos y sus organismos, la IIA representa principalmente al mercado de la irradiación industrial. La IIA colabora con el OIEA en un número de iniciativas cada vez mayor.

P: ¿Qué avance en el ámbito de la irradiación industrial basada en aceleradores lo entusiasma más? ¿Sería revolucionario?

R: Un nuevo enfoque muy prometedor es la irradiación con electrones y rayos X de baja energía. Basada en el uso de aceleradores o lámparas emisoras en miniatura, esta innovación podría poner la irradiación al alcance de los fabricantes de muchos sectores. La penetración de los rayos de baja energía en los materiales limita las posibles aplicaciones, pero los emisores tienen la ventaja de ser compactos y pueden integrarse en las líneas de fabricación. Las aplicaciones iniciales incluyen la esterilización de jeringas antes del llenado en la industria farmacéutica y la esterilización de materiales a alta velocidad en las cadenas de envasado aséptico de leche o refrescos.

Por poner un ejemplo, una empresa de Suiza ha desarrollado una máquina para descontaminar ingredientes alimentarios que es del tamaño de un armario grande. Estos sistemas también se utilizan en el control de plagas mediante la técnica del insecto estéril, que el OIEA promueve constantemente, y para la investigación en radiobiología. Todavía es necesario ampliar el ámbito de las posibles aplicaciones, especialmente el uso de sistemas compactos de rayos X de baja energía, pero no cabe duda de que esto podría ser algo revolucionario.

MYRRHA: Un sistema accionado por acelerador para la gestión de desechos radiactivos

Hamid Aït Abderrahim



Hamid Aït Abderrahim es el Director General Adjunto de Asuntos Internacionales en el SCK•CEN y Director del proyecto MYRRHA y de su organización sin fines de lucro. Es profesor de física de reactores e ingeniería nuclear en la Universidad Católica de Lovaina, así como coordinador y asociado de diversos proyectos de la Comisión Europea relacionados con la gestión progresiva de sistemas nucleares, separación de

desechos nucleares de alta actividad y transmutación. Es miembro de diversos consejos científicos, organizaciones de investigación e institutos internacionales. En 2014, el rey de Bélgica lo nombró Gran Oficial de la Orden de la Corona por sus aportaciones en el ámbito de la ciencia de energía nuclear y el cierre del ciclo del combustible nuclear.

Un argumento importante —y falso— que se cita a veces para oponerse a la energía nucleoelectrónica es que “el problema de los desechos nucleares no tiene solución”. El combustible nuclear gastado que no ha sido reprocesado es radiotóxico, con niveles superiores a los que se observan en el mineral de uranio natural, durante aproximadamente 300 000 años, y la mayor parte del uranio y plutonio que contiene no se quema. Si bien existen soluciones técnicas para la disposición final a largo plazo, existe otra opción: el reciclaje del combustible nuclear.

Tanto el uranio como el plutonio del combustible gastado pueden reciclarse mediante el reprocesamiento y luego utilizarse en nuevos combustibles nucleares para seguir generando energía eléctrica. No obstante, los residuos del reprocesamiento estándar deja actínidos menores —elementos que se encuentran cerca del uranio en la tabla periódica y que

no pueden quemarse en los reactores de potencia actuales. Los desechos radiactivos que los contienen necesitan 10 000 años para volver a los niveles naturales.

El MYRRHA (reactor de investigación híbrido de fines múltiples para aplicaciones de alta tecnología) es un proyecto que actualmente se encuentra en construcción en el Centro de Estudios de Energía Nuclear (SCK•CEN) de Bélgica; está basado en el concepto de sistema accionado por acelerador (SAA) y tiene por objetivo hacer frente al problema de los actínidos y, particularmente, los menores. El proyecto busca probar, a nivel de ingeniería, el SAA y demostrar la viabilidad de la transmutación de los actínidos menores a escala industrial. Al reducir la radiotoxicidad, se podría reducir el volumen de los desechos radiactivos de actividad alta en un 99 % y el tiempo necesario para el almacenamiento a solo 300 años.

El diseño del MYRRHA se diferencia de la mayoría de los reactores actuales en dos aspectos importantes. Por un lado, utiliza neutrones rápidos, que son necesarios para la fisión de los actínidos menores. Por otro, puede funcionar en modo subcrítico, es decir, sin causar una reacción de fisión en cadena autosostenida, dado que se acopla a un acelerador de protones de alta energía, lo que genera los neutrones primarios necesarios en el centro del núcleo del reactor mediante reacciones de espalación. Esto es indispensable para garantizar el control de la reactividad al quemar los actínidos menores y tiene la ventaja adicional de que, en cuanto el acelerador se detiene, la reacción de fisión en cadena también lo hace y el reactor se apaga. Como medida de seguridad primordial, está diseñado de manera tal que el calor residual de la desintegración pueda eliminarse mediante circulación natural sin un sistema activo ni intervención.

Con el fin de transmutar una proporción sustancial de los desechos de combustible gastado del mundo, se

precisará una red de instalaciones industriales. Hasta la fecha, se han probado las tecnologías que se utilizan en el MYRRHA de manera individual a escala de laboratorio en instalaciones experimentales. Por lo tanto, el MYRRHA es una central piloto preindustrial que busca integrar y probar las tecnologías a escala al tiempo que aumenta considerablemente la fiabilidad.

Existen muchas dificultades científicas, técnicas y de reglamentación que tendrán que afrontarse durante el desarrollo de este proyecto único en su clase. Un examen previo a la concesión de la licencia realizado por el Organismo de Regulación Nuclear de Bélgica, tras consultas con los desarrolladores del proyecto, no ha puesto de manifiesto ninguna preocupación lo suficientemente grave como para poner en duda el futuro de la licencia del MYRRHA. Esperamos que esto atraiga al ámbito nuclear a muchos jóvenes de Bélgica y de otros lugares, algo que el país considera que es de gran importancia.

Si bien el énfasis principal del proyecto es gestionar los desechos radiactivos, existen muchas otras aplicaciones de esta instalación en el campo de la investigación y el desarrollo de vanguardia. El proyecto MYRRHA se divide en tres etapas: La primera ya se encuentra en construcción y consiste en completar la parte del complejo del acelerador de protones de baja energía (100 megaelectronvoltios (MeV)). Se espera que la mayoría de las actividades de investigación comiencen hacia 2027. Estas se centrarán en el sistema en línea de separación isotópica (ISOL@MYRRHA), que puede seleccionar isótopos individuales a fin de utilizarlos en radiofármacos y producir haces de iones radiactivos para una gran variedad de experimentos de física nuclear complementados con una instalación de pleno funcionamiento (FPF) apta para la investigación de materiales de fusión.

La alta precisión de las mediciones que puede realizarse de los haces radiactivos proporcionadas por ISOL@MYRRHA también pueden ayudar a comprender la validez del “modelo estándar” de la física de partículas. Si la primera etapa tiene éxito y demuestra la fiabilidad de este acelerador novedoso, que es necesaria para el SAA, en la segunda etapa se pondrá en pleno funcionamiento el acelerador de protones (600 MeV). La etapa final será la construcción del reactor subcrítico propiamente dicho. El plomo-bismuto (Pb-Bi) se

utiliza como refrigerante para eliminar el calor generado del reactor nuclear. El diseño del núcleo del reactor es flexible y puede cargarse con combustibles de óxidos mixtos, actínidos menores y blancos para la producción de isótopos de uso médico. Ofrecerá plataformas para las pruebas de irradiación y corrosión de materiales estructurales futuros para la fisión rápida e incluso futuros reactores de fusión. El reactor del MYRRHA refrigerado por Pb-Bi puede utilizarse como una central de ensayo de tecnología experimental para la cuarta generación de reactores rápidos refrigerados por plomo.

El Gobierno de Bélgica ha invertido hasta ahora unos 200 millones de euros en el proyecto MYRRHA y ha complementado 558 millones de euros en 2018 para el período 2019-2038, según una estimación total del proyecto de 1600 millones de euros. Se ha creado una entidad sin fines de lucro que permitirá que MYRRHA atraiga inversiones futuras de gobiernos y entidades extranjeros para avanzar con la segunda y tercera etapas, y que funcione como organización internacional. Se ha incluido el MYRRHA en el Foro Europeo de la Estrategia sobre Infraestructuras de Investigación (ESFRI), compuesto por proyectos que las comunidades investigadoras consideran de vanguardia, y el Comité de Colaboración Europea en Física Nuclear (NuPECC) incluyó el sistema ISOL@MYRRHA en su plan de largo alcance de principales instalaciones europeas de física nuclear. El Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (SET Plan), diseñado para promover las tecnologías con bajas emisiones de carbono, también incluye el MYRRHA, lo que le permite recibir financiación del Banco Europeo de Inversiones.

La posibilidad de reciclar uranio y plutonio con el fin de utilizarlos como combustible para los sistemas de espectro de neutrones rápidos también reduce la demanda de extracción del mineral de uranio y aumenta considerablemente la cantidad de energía que se recupera de este. Muchas industrias buscan un mayor rendimiento en el uso de la materia prima y la reducción de desechos, razón por la cual se ha integrado el MYRRHA en las políticas nacionales de Bélgica para la inversión estratégica y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima.

Representación tridimensional de la instalación completa del MYRRHA.

(Fotografía: MYRRHA)



Hacia una transición energética “justa”

La energía nucleoelectrica presume de ofrecer los empleos mejor remunerados del sector de las energías limpias



Según una nueva investigación, las inversiones en la producción de energía nuclear generan más puestos de trabajo, que además están mejor remunerados, que las inversiones en otras fuentes de electricidad con bajas emisiones de carbono.

(Fotografía: OIEA)

Según una nueva investigación presentada en un evento del OIEA, la transición hacia la energía limpia generará más puestos de trabajo de los que se pierden en la transición para abandonar los combustibles fósiles, y los empleos mejor remunerados seguirán estando en el campo de la energía nucleoelectrica, que proporciona una cantidad considerable de puestos de trabajo sostenibles que benefician a las economías locales y regionales.

Más de 130 países están considerando fijarse el objetivo de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050 o incluso comprometiéndose a cumplirlo, por lo que es fundamental prepararse para el impacto que esa transición energética tendrá en el mercado laboral. Representantes del sector de las energías limpias participaron hace poco de un seminario web del OIEA sobre cómo hacer que aumente el nivel de vida y se creen puestos de trabajo a medida que las inversiones en materia de energía se ajustan para cumplir los objetivos climáticos.

“Al abandonar los combustibles fósiles no se debe dejar a nadie atrás: ese es el concepto de una transición ‘justa’”, dijo Henri Paillere, Jefe de la Sección de Estudios Económicos y Planificación del OIEA, en el seminario web titulado Invertir en Tecnologías con Bajas Emisiones de Carbono: Creación de Empleo para unas Transiciones Energéticas Justas. “Es necesario invertir a gran escala en todas las tecnologías limpias, lo cual debe hacerse de forma que se creen puestos de trabajo, se fomente el crecimiento económico y se contribuya al desarrollo sostenible”.

De acuerdo con un documento de trabajo publicado por el Fondo Monetario Internacional (FMI), las inversiones en fuentes de energía limpia, como la solar, la eólica y la nuclear, repercuten positivamente en el producto interno bruto (PIB) entre dos y siete veces más que las inversiones en fuentes fósiles como el gas, el carbón y el petróleo. Según un análisis presentado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) en el seminario web, en el caso hipotético

de que el aumento de la temperatura mundial se limite a 1,5 grados Celsius, en consonancia con los objetivos climáticos mundiales, los puestos de trabajo en el sector de las energías renovables podrían aumentar de 12 millones a 38 millones para 2030.

Según Michael Renner, Oficial de Programas del Centro de Conocimientos, Políticas y Finanzas de la IRENA, en el mismo período la cantidad de otros puestos de trabajo relacionados con la transición energética podría pasar de 16 millones a 74 millones. En cambio, los puestos de trabajo en el sector de la energía convencional se reducirían de 39 millones a 27 millones.

Según el documento del FMI, las inversiones en el campo de la energía nucleoelectrica producen un efecto multiplicador mayor en términos económicos que cualquier otra fuente de energía limpia. En dicho documento también se muestra que la energía nucleoelectrica crea alrededor de un 25 % más de puestos de trabajo por unidad de electricidad que la energía eólica y que los trabajadores de la industria nuclear

ganan un tercio más que los del sector de las energías renovables.

Philippe Costes, Asesor Superior de la Asociación Nuclear Mundial (WNA), presentó resultados similares, y afirmó en el seminario web que la energía nucleoelectrica ofrece puestos de trabajo con salarios más altos, aproximadamente entre un 25 % y un 30 % más altos, que cualquier otra tecnología energética. Pero, algo importante, aunque la energía nucleoelectrica proporciona puestos de trabajo a nivel local en torno a las centrales y a nivel regional durante la construcción, de forma similar a la energía eólica, solo la energía nucleoelectrica proporciona un número considerable de puestos de trabajo sostenibles en las economías locales y regionales durante la operación de las centrales”.

El Sr. Costes mencionó que las investigaciones de la WNA han revelado que la energía nucleoelectrica proporciona alrededor de un 25 % de puestos de trabajo más por unidad de electricidad en los Estados Unidos de América y Francia que la energía eólica, y que se trata de empleos bien remunerados, a largo plazo y predominantemente locales. Asimismo, añadió que los beneficios económicos a largo plazo de la energía nucleoelectrica también se reflejan en el aumento del nivel de localización en los países en fase de incorporación, señalando el ejemplo de la República de Corea, que aumentó su uso de la energía nucleoelectrica al tiempo que se convertía en la 11ª potencia económica a nivel mundial, a mediados de la década de 1990. La energía

nucleoelectrica produce casi un tercio de la electricidad de ese país.

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), alrededor del 60 % de los 30 millones de nuevos trabajadores que se necesitarán para 2030 en los campos de las energías limpias, la eficiencia energética y las tecnologías de bajas emisiones cubrirán puestos nuevos para los que deberán estar altamente calificados, lo que requerirá estudios superiores, como títulos universitarios o de formación profesional. Según Daniel Wetzel, Jefe de la Dependencia de Seguimiento de las Transiciones Sostenibles de la AIE, los Gobiernos y las instituciones académicas deben empezar a implantar políticas para crear esa cartera de trabajadores del futuro.

— *Nicholas Watson y Lucy Ashton*

Identificada en tiempo récord una cepa de fiebre aftosa en Túnez con la ayuda del OIEA y la FAO



Un veterinario recoge una muestra oral de una vaca de la que se sospecha que tiene fiebre aftosa en Nabeul, en el noreste de Túnez. (Fotografía: T. Ben Hassine/Ministerio de Agricultura, Recursos Hídricos y Pesca de Túnez)

A principios de 2022, un laboratorio de virología de Túnez recibió muestras orales de vacas que los veterinarios sospechaban que tenían fiebre aftosa. Se trata de una enfermedad muy contagiosa que afecta a los animales de pezuña hendida, como las vacas, los cerdos y las cabras, y puede provocar la interrupción del comercio regional e internacional de animales y productos de origen animal. Esta enfermedad se caracteriza por la presencia de fiebre y llagas similares a

ampollas en las pezuñas, en la boca y en la lengua y los labios.

A los pocos días de enviar las muestras a un servicio de secuenciación de ADN, Soufien Sghaier, virólogo del Laboratorio de Virología del Instituto de Investigación Veterinaria de Túnez (IRVT), recibió los resultados que ayudaron a confirmar que había en circulación una cepa de la fiebre aftosa. El Sr. Sghaier pudo notificarlo

a las autoridades veterinarias para que adoptaran medidas de control con el fin de que la enfermedad no se siguiera propagando. La enfermedad se confirmó de forma oportuna gracias al OIEA, que, en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), facilita el servicio de secuenciación e imparte la capacitación necesaria para procesar los resultados.

“Recibimos muy rápidamente los resultados de la secuenciación de un caso que sospechábamos que era de fiebre aftosa. Las muestras se enviaron a un laboratorio de Berlín el viernes y recibimos los resultados el lunes por la tarde” explica el Sr. Sghaier. “Eso nos permitió realizar un análisis para identificar la cepa específica de fiebre aftosa en un tiempo récord. Para el martes habíamos enviado el informe sobre esa cepa a las autoridades veterinarias”. Es necesario identificar las cepas de fiebre aftosa para seleccionar o desarrollar vacunas eficaces.

La secuenciación genética es importante para determinar si una enfermedad que está circulando en un lugar es endémica o se ha importado de otro sitio. “La secuenciación genética nos ayuda a entender a qué agrupación de casos pertenece un patógeno (un organismo que causa una enfermedad) y qué vacuna es eficaz para combatirlo”, explica Ivancho Naletoski, Responsable de Sanidad Animal del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura. A partir de la secuenciación genética, se puede crear un árbol filogenético de la estirpe de una especie.

“Mediante el análisis filogenético, determinamos que ya disponíamos de una vacuna para proteger al ganado. Las autoridades veterinarias llevaron a cabo la vacunación perifocal para reducir el riesgo de propagación de la fiebre aftosa”, dice el Sr. Sghaier. La vacunación perifocal, o vacunación de barrera, puede ayudar a evitar que el virus se propague a otras regiones geográficas.

El servicio de secuenciación genética OIEA-FAO

Gracias al servicio de secuenciación genética gratuito, los países pueden secuenciar los patógenos para analizarlos en profundidad. Hasta la fecha, 30 laboratorios de 24 países de África, América Latina, Asia y el Pacífico y Europa han enviado más de 5300 muestras.

“Es bastante costoso instalar tecnologías de secuenciación genética en los laboratorios locales”, dice el Sr. Naletoski. “No hay una necesidad masiva de secuenciar cada caso específico; solo se necesitan unas pocas muestras de determinados brotes. En

términos de viabilidad económica, tiene sentido habilitar una vía para que las contrapartes tengan acceso a un servicio de secuenciación”. El OIEA ha elaborado y difundido instrucciones técnicas detalladas para procesar los datos brutos y generar árboles filogenéticos de los patógenos que circulan localmente, teniendo en cuenta los resultados proporcionados.

Además, el Centro Conjunto FAO/OIEA celebró cursos de capacitación para laboratorios sobre cómo utilizar el servicio, en Marruecos en 2017 y en la Argentina en 2018. A nivel nacional, este servicio desempeña un papel en los programas de seguimiento de enfermedades; a nivel mundial, contribuye a los estudios pertinentes y a la comunidad científica mundial. Hasta la fecha, se han publicado en revistas revisadas por pares más de 30 artículos, basados en los resultados obtenidos a través del servicio de secuenciación, y decenas de secuencias se han publicado en bases de datos de código abierto.

— *Joanne Liou*

Mejora de la protección radiológica en los procedimientos médicos que utilizan fluoroscopia

Los procedimientos mínimamente invasivos guiados por imágenes, que entrañan menos riesgos que la cirugía tradicional, hospitalizaciones más cortas y una recuperación más rápida, se utilizan cada vez con más frecuencia en todo el mundo. En 2020 se realizaron en total 24 millones de procedimientos de este tipo, lo que representa un aumento de más del séxtuple desde 2008. Sin embargo, puede haber un problema: si no se toman las precauciones adecuadas, los pacientes y el personal médico pueden verse expuestos de manera innecesaria a la radiación de los rayos X que el personal médico utiliza durante la fluoroscopia para “ver” lo que está haciendo dentro del cuerpo.

“Hemos detectado nuevos desafíos en materia de protección radiológica debido a los avances técnicos y al aumento de la complejidad de estos procedimientos, así como posibles lagunas en materia de orientación y capacitación para mejorar la protección

radiológica de los pacientes y el personal”, declaró Jenia Vassileva, Especialista en protección radiológica del OIEA.

La fluoroscopia es un procedimiento mediante el cual se visualiza en un monitor una radiografía en tiempo real producida por rayos X que atraviesan el cuerpo.

En una reunión celebrada recientemente por el OIEA, como parte del apoyo que presta a la comunidad médica, más de 100 expertos de 42 países y 18 organizaciones internacionales y organismos profesionales discutieron los progresos en materia de protección radiológica y los retos que se plantean durante los procedimientos de intervención guiados por fluoroscopia. Hicieron hincapié en las formas de mejorar la protección radiológica de los pacientes y el personal médico cuando se aplican esos procedimientos, que pueden causar lesiones en la piel a los pacientes y cataratas por irradiación al personal médico que los realiza.

Gestión de la protección radiológica de los pacientes y el personal médico

A menudo, los efectos deterministas son solo el enrojecimiento de la piel o la pérdida de cabello, pero, en unos pocos casos, se pueden presentar reacciones más graves, como úlceras o necrosis cutánea, a veces semanas, meses o incluso años después.

“Los factores asociados con las dosis elevadas son la talla del paciente y la complejidad médica del procedimiento, pues cuando son grandes se requiere una fluoroscopia prolongada; sin embargo, en la mayoría de los casos, los efectos deterministas graves no intencionados se deben a la falta de conocimientos y de conciencia del operador”, dijo el presidente de la reunión, Stephen Balter, Profesor de Radiología Clínica y Medicina de la Universidad de Columbia (Estados Unidos de América).



La fluoroscopia es un procedimiento mediante el cual se visualiza en un monitor una radiografía en tiempo real producida por rayos X que atraviesan el cuerpo. La protección radiológica de los pacientes y del personal médico durante este procedimiento es primordial. (Fotografía: Desislava Kostova-Lefterova, Hospital Nacional de Cardiología, Sofía (Bulgaria))

“Llevó más de un año descubrir que el procedimiento de fluoroscopia prolongado me había causado la lesión y pasé más de 15 meses sin dormir más de dos horas seguidas. El dolor era indescriptible”, dice Hal Workman, un paciente que sufrió una lesión cutánea grave como consecuencia de una intervención cardíaca realizada hace 14 años.

Los participantes también tomaron conocimiento de los últimos avances en tecnología de fluoroscopia, incluido un tipo de cartografía de las dosis en la piel en que las dosis de radiación se distribuyen visualmente en color o en escala de grises. Esto proporciona a los operadores información para hacer un seguimiento de la dosis y así ajustar mejor el procedimiento y no lesionar la piel del paciente.

“Tras 20 años de esfuerzos, se han reducido drásticamente los casos de lesiones cutáneas”, dijo el Sr. Balter. “Eso se debe principalmente a las mejoras introducidas en los equipos de fluoroscopia y en los dispositivos médicos utilizados para estos procedimientos”. El Sr. Balter

resaltó que es importante planificar, especialmente en el caso de los pacientes con obesidad y de los que se someten a múltiples procedimientos, y vigilar constantemente la dosis administrada y hacer un seguimiento proactivo de las reacciones cutáneas que pueden aparecer cuando sea necesario utilizar una cantidad considerable de radiación en un procedimiento complejo.

Además, en muchos países sigue siendo difícil hacer un seguimiento de las dosis que recibe el personal médico. Los esfuerzos para aumentar la protección radiológica incluyen, por ejemplo, el uso de dosímetros electrónicos en tiempo real, sistemas de video para el seguimiento automático del personal y simuladores virtuales.

La Sra. Vassileva dijo que la concienciación del personal médico sobre la protección radiológica también contribuiría en gran medida a reducir la exposición de dicho personal y de los pacientes. Los participantes en la reunión afirmaron que la capacitación en video orientada a la práctica, como los nuevos tutoriales prácticos del

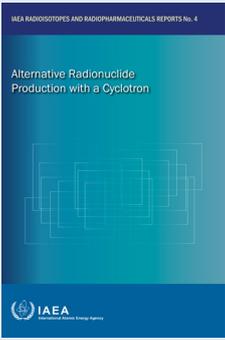
OIEA sobre protección radiológica en procedimientos de intervención, es eficaz en ese sentido.

Estudio del OIEA para aumentar la conciencia

Para colmar las lagunas existentes en los datos sobre los efectos deterministas en los pacientes y comparar las prácticas a nivel internacional, el OIEA ha puesto en marcha un estudio internacional sobre las dosis que reciben los pacientes y los efectos deterministas de los procedimientos de intervención guiados por fluoroscopia.

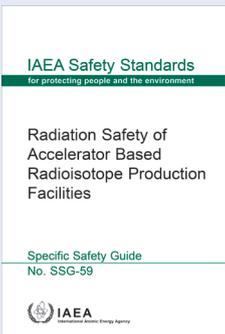
“Nuestro objetivo es recopilar datos a escala global, lo que nos ayudará a actualizar los valores de las dosis que se utilizan para iniciar los procedimientos de seguimiento de los pacientes que corren el riesgo de presentar reacciones en la piel”, dijo la Sra. Vassileva.

— *Margherita Gallucci y Natalia Ivanova*



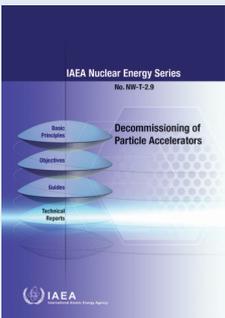
Alternative Radionuclide Production with a Cyclotron

En la actualidad, los ciclotrones se utilizan para preparar una amplia variedad de radionucleidos que tienen aplicaciones en las tomografías computarizadas por emisión de fotón simple (SPECT) y las tomografías por emisión de positrones (PET). En consecuencia, existe una elevada demanda de los Estados Miembros del OIEA de apoyo en el ámbito de la producción de radiofármacos mediante radioisótopos producidos en ciclotrones. En esta publicación se describen las posibles vías de producción de radionucleidos mediante el uso de ciclotrones en diferentes rangos de energía y proporciona tanto métodos para la producción de blancos como información detallada sobre los procesos químicos necesarios para separar los radionucleidos de los materiales utilizados como blanco. Esta publicación está dirigida a científicos, operadores interesados en poner en práctica esta tecnología, tecnólogos que ya trabajan con ciclotrones y desean mejorar la utilidad de los aparatos ya existentes, y personal directivo que se encuentra en proceso de establecer instalaciones de radionucleidos en sus países. Esta publicación también puede ser útil para estudiantes de educación superior en ámbitos conexos.



Radiation Safety of Accelerator Based Radioisotope Production Facilities

Los radioisótopos se utilizan en todo el mundo en una serie de aplicaciones médicas, industriales, académicas y de investigación. Una gran parte de estos radioisótopos se produce en aceleradores de partículas y el número de instituciones que operan aceleradores lineales o ciclotrones y producen y fabrican radiofármacos, por ejemplo, es considerable y va en aumento. La producción de radioisótopos mediante aceleradores de partículas plantea riesgos radiológicos importantes para trabajadores, miembros del público y el medio ambiente cuando se operan los aceleradores sin tomar medidas de seguridad radiológica adecuadas. Esta guía de seguridad ofrece orientaciones prácticas para implementar medidas de protección y seguridad radiológicas en instalaciones que producen y utilizan radioisótopos.



Decommissioning of Particle Accelerators

Esta publicación presenta información sobre experiencias y enseñanzas extraídas de la puesta en marcha de proyectos de clausura de aceleradores de partículas. Sobre la base de esta información, y haciendo énfasis en cuestiones y preocupaciones comunes, se ofrece información práctica para aquellas personas que desempeñan alguna función en este proceso. La publicación está dirigida a operadores de instalaciones de acelerador, en concreto las que se acercan a la etapa de clausura, o mantienen una instalación en estado de desmantelamiento diferido, así como para reguladores, gestores de desechos, encargados de adoptar decisiones a nivel gubernamental, autoridades locales, contratistas que participan en la clausura y diseñadores de aceleradores. Se prevé que las enseñanzas extraídas que figuran en esta publicación contribuyan a la planificación de la clausura durante la etapa de diseño de nuevas instalaciones y, por tanto, se reduzca al mínimo la generación de desechos radiactivos sin poner en riesgo las características estructurales ni la eficacia de la construcción.



Compact Accelerator Based Neutron Sources

La producción de neutrones con aceleradores comenzó en la década de 1970 con la construcción de potentes aceleradores de protones para disponer de neutrones a través de la espalación. Al mismo tiempo, surgieron procesos de neutrones con baja energía para la producción de neutrones mediante aceleradores de electrones, aceleradores de haces de iones, ciclotrones y aceleradores lineales de baja energía. Esta gran variedad de fuentes de neutrones basadas en aceleradores ha adquirido el nombre de “fuentes de neutrones compactas basadas en aceleradores” (CANS). Esta publicación ofrece un panorama general de los diversos tipos de tecnologías CANS que actualmente se encuentran disponibles o se prevén para un futuro próximo. También ilustra muchas de las aplicaciones analíticas y de otro tipo de los neutrones. Debido a la amplia variedad de potencia y costos, la publicación también tiene por objeto mostrar que, además de sustituir los reactores de investigación de flujo medio nacionales para ciertas funciones, las fuentes de neutrones regionales más pequeñas pueden acabar siendo viables, lo que podría ampliar el acceso a las instalaciones de neutrones en el futuro.

Si necesita información adicional o desea encargar una publicación, póngase en contacto con:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, A-1400 Viena (Austria)

Correo electrónico: sales.publications@iaea.org

Lea este y otros números del *Boletín del OIEA* en línea en
www.iaea.org/es/bulletin

Para más información sobre el OIEA y su labor, visite
www.iaea.org

o síguenos en

