CSN
ALFA
Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 55
Septiembre 2023

RADÓN
El enemigo silencioso

UNSCEAR, el comité científico de Naciones Unidas que estudia los efectos de la radiación ionizante

Carlos Hidalgo, director del Laboratorio Nacional de Fusión: "En fusión nuclear, España es un caso de éxito"

Nueva sección:
CSN I+D

I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear 2023-2026

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

El CSN y la investigación

Para llevar a cabo su trabajo de regulación de los usos de la energía nuclear y de las radiaciones ionizantes, el Consejo de Seguridad Nuclear debe mantenerse al día en los avances que la ciencia y la tecnología aportan en su ámbito de actuación. Más aún, considera que debe fomentar esa investigación, y por ello cuenta con un Plan de I+D, dedicado a financiar proyectos de universidades y otras instituciones. En la última convocatoria, resuelta en diciembre de 2022, se aprobaron 15 proyectos, con más de un millón de euros de dotación.

Con el objetivo de difundir las propuestas y resultados de algunos de los proyectos financiados en pasadas ediciones, se ha incorporado a la revista una nueva sección, denominada *CSN I+D.* En este número se presenta un proyecto del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura (Laruex), sobre la regulación de las evaluaciones de impacto radiológico ambiental.

Entre los reportajes incluidos en este número destaca el dedicado al gas radón, cuyos efectos sobre la salud son cada vez más preocupantes. La OMS asegura que es responsable de entre el 3 y el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón y España ultima un plan nacional para mejorar el conocimiento, la gestión y la prevención de este gas radiactivo de origen natural. En otro reportaje explicamos el funcionamiento del Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), creado en 1955 y que actualmente está formado por expertos de 30 países, entre ellos España. El apartado de *Ciencia con nombre propio* narra la vida de la física estadounidense Edith Hinkley Quimby, pionera mundial de la física médica, que sentó las bases de la radioterapia moderna y la seguridad radiológica.

> *Según la OMS, el radón, un gas radiactivo de origen natural, provoca entre el 3 y el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón de todo el mundo*

En otros ámbitos, incluimos un reportaje sobre las investigaciones que se llevan a cabo para mejorar la eficacia de las baterías de ión-litio, protagonistas de la eclosión del vehículo eléctrico y de los aparatos electrónicos que utilizamos cotidianamente. También dedicamos otro espacio al *machine learning,* o los sistemas de aprendizaje autónomo de las máquinas, causantes de la actual revolución de la inteligencia artificial. Por último, ofrecemos un reportaje dedicado a la microbiota humana, ese conjunto de billones de microorganismos que habitan en nuestro interior y que juegan un papel esencial en la nutrición, el equilibrio corporal y la salud.

La *Entrevista* de este número recoge las opiniones de Carlos Hidalgo, director del Laboratorio Nacional de Fusión, acerca del futuro de la fusión nuclear como fuente de energía capaz de ayudar a resolver la crisis energética, aunque sea a un plazo aún indeterminado.

En la parte más técnica de Alfa, la sección *Radiografía* está dedicada a la seguridad en el transporte de material radiactivo, que se basa en una normativa internacionalmente aceptada, un sistema de aprobaciones claramente definido y una supervisión y control. El primer artículo está dedicado a la eficacia de los PAR en una central PWR-W genérica de tres lazos con contención seca, a partir de un trabajo realizado por el Ciemat para el CSN de cálculos con el código MELCOR, desarrollado por la NRC para estudiar la progresión de un accidente severo. El segundo artículo explica el contenido de la Guía de Seguridad del CSN GS-05.17, que establece recomendaciones para un adecuado procedimiento de calibración y verificación de monitores de radiación.

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 55
Septiembre 2023

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445

Comité Editorial
Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Teresa Vázquez Mateos
Javier Zarzuela Jiménez
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Ignacio Fernández Bayo

Comité de Redacción
J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez
Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Juan Enrique Marabotto García
Ignacio Fernández Bayo

Edición y distribución
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
Fax 91 346 05 58
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial
Divulga S.L.
C/Diana, 16
28022 Madrid

Fotografías
CSN, Divulga, OIEA, DepositPhotos, IStock.

Impresión
Editorial MIC
C/Artesiano s/n
Pol. Ind. Trobajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada
Envases para prueba de radón

Depósito legal: M-24946-2012
ISSN-1888-8925

© Consejo de Seguridad Nuclear

Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista *Alfa* las comparta necesariamente.

REPORTAJES

DEPOSITPHOTOS

6 El aprendizaje de las máquinas

La clave de la explosión actual de los sistemas de inteligencia artificial es haber conseguido máquinas capaces de adquirir, e incluso generar, nuevos conocimientos, más allá de la información que se les ha suministrado previamente. Es lo que se ha popularizado por su terminología inglesa: *machine learning*.

12 El enemigo silencioso

El radón es un gas incoloro, inodoro, insípido y radiactivo, que se libera de manera natural de algunas rocas. Según la OMS es responsable de entre el 3 y el 15% de las muertes por cáncer de pulmón y España prepara un Plan Nacional Contra el Radón que completará la trasposición de una Directiva europea sobre el tema.

DEPOSITPHOTOS

35 La revolución de las baterías

El vehículo eléctrico es la principal alternativa a los de combustión, pero conseguir la plena electrificación del mercado automovilístico exige una nueva generación de baterías. Para 2027 se espera tener la batería de estado sólido, que permitirá una autonomía de más de mil kilómetros y se recargará en menos de 15 minutos.

36 El comité de la ONU que estudia los efectos de la radiación ionizante

En 1955 se creó el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), ante la preocupación de la comunidad internacional por el posible impacto sobre la salud de las pruebas nucleares. Actualmente está formado por expertos de 30 países, entre ellos España, y este año ha celebrado su 70ª reunión.

DEPOSITPHOTOS

52 Nuestros inseparables compañeros de existencia

Estamos formados por unos 37 billones de células y, al mismo tiempo, albergamos una cantidad similar de microorganismos. Es la denominada microbiota humana. En los últimos años los científicos han ahondado en sus múltiples funciones y en su importancia para mantener el equilibrio de nuestro organismo y nuestra salud.

58 Edith Hinkley Quimby y el nacimiento de la radioterapia

Poco después de iniciarse la Primera Guerra Mundial, la física estadounidense Edith Hinkley Quimby se interesó por el cálculo preciso de las dosis de radiación y sus límites, lo que sentó las bases de la radioterapia moderna y la seguridad radiológica. Su trabajo la convirtió en pionera mundial de la física médica.

RADIOGRAFÍA

24 **Procesos de transporte de material radiactivo**

La seguridad en el transporte de material radiactivo se basa en una normativa internacionalmente aceptada, un sistema de aprobaciones claramente definido y una supervisión y control, donde la inspección es la actividad más importante.

ENTREVISTA

26 **Carlos Hidalgo, director del Laboratorio Nacional de Fusión**

"En fusión nuclear, España es un ejemplo de éxito científico y tecnológico"

ARTÍCULOS TÉCNICOS

17 **Eficacia de los PAR en centrales PWR-W con contención seca**

Los accidentes severos generan gran cantidad de gases combustibles (H_2 y CO) cuya combustión incontrolada podría ocasionar la liberación de productos de fisión al exterior. Tras Fukushima, el CSN requirió la instalación de los llamados PAR en las centrales españolas de diseño estadounidense. Este artículo presenta su eficacia en una central PWR-W genérica de tres lazos con contención seca.

42 **Calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección para la medida de la radiación y contaminación en instalaciones radiactivas**

La Guía de Seguridad del CSN GS-05.17 se ha elaborado con el objeto de facilitar a las instalaciones radiactivas el cumplimiento de la especificación técnica I.6 de la Instrucción IS-28, estableciendo recomendaciones para un adecuado procedimiento de calibración y verificación y seleccionar monitores de radiación apropiados en función de las características específicas de la instalación radiactiva.

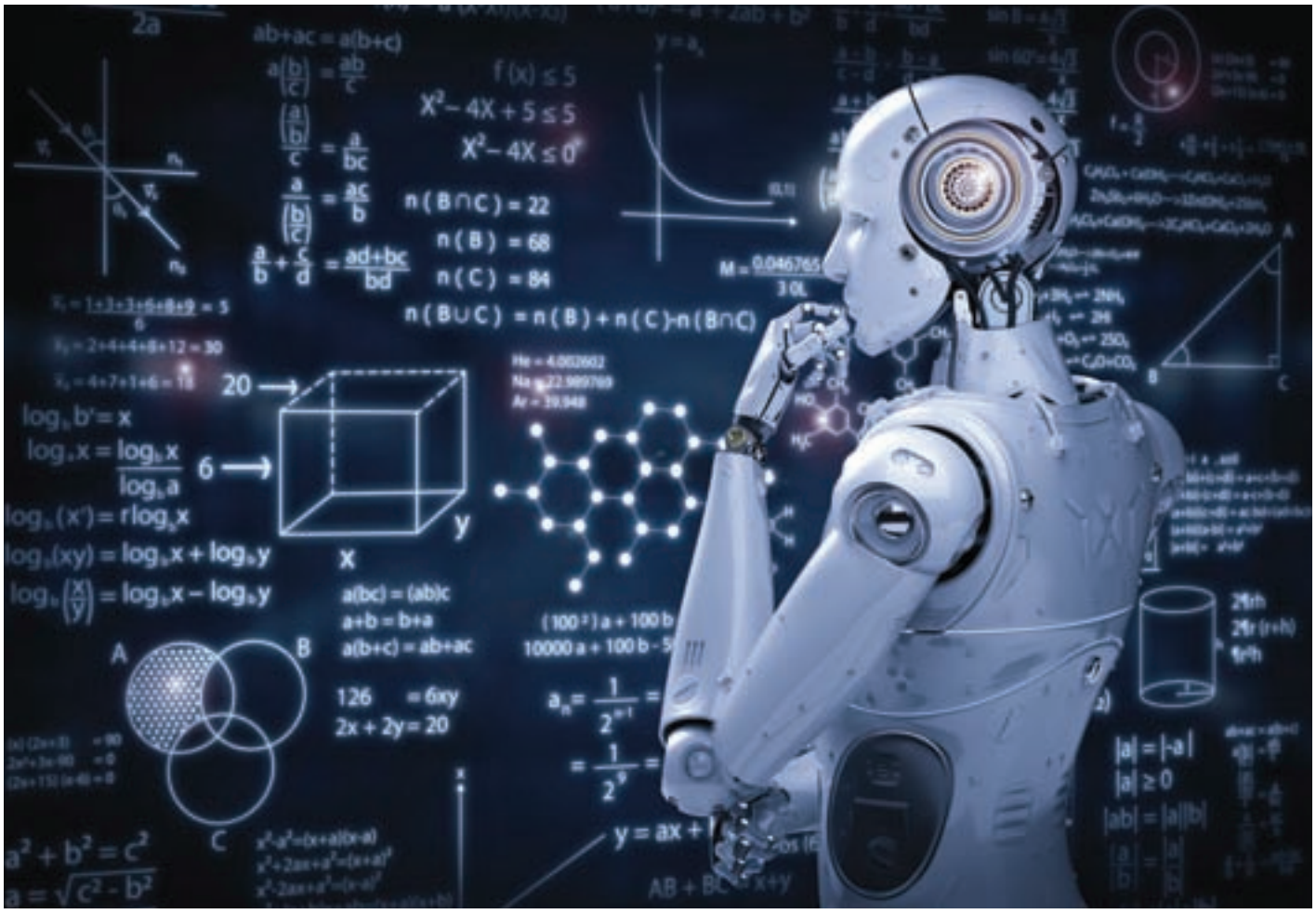
CSN I+D

50 **Regulación de la evaluación del impacto radiológico ambiental**

El proyecto Regulación de la Evaluación del Impacto Radiológico Ambiental, financiado por el CSN en su convocatoria de ayudas para I+D+i de 2021, desarrolla metodologías para adaptar las evaluaciones a los entornos geoclimáticos españoles.

63 **Reacción en cadena**
67 **Panorama**
70 **Publicaciones**
71 **Abstracts**

DEPOSITPHOTOS



El 'Machine learning', una rama de la inteligencia artificial en auge

El aprendizaje de las máquinas

La clave de la explosión actual de los sistemas de inteligencia artificial es haber conseguido máquinas capaces de adquirir, e incluso generar, nuevos conocimientos, más allá de la información que se les ha suministrado previamente. Pero ¿pueden las máquinas aprender? En tiempos de inteligencia artificial (IA), en los que las noticias, las promesas y las dudas proliferan, hay un abanico de términos nuevos para la sociedad que empiezan a sernos cada día más familiares. Es el caso del aprendizaje automático, a menudo mencionado por su expresión en inglés, *machine learning*, y que se refiere precisamente a la capacidad de las máquinas para aprender a partir de los datos que van adquiriendo y analizando por si solas.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** | periodista de ciencia ■

Aunque resulte muy tecnológico y actual, el término *machine learning* no es nuevo. Su origen se remonta al siglo pasado, pero los entendidos no se ponen de acuerdo con la fecha exacta. Hay quien se refiere al año 1943 y al artículo científico *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity* de Walter Pitts y Warren McCulloch, en el que se presenta el primer modelo matemático de redes neuronales. También quien señala a 1952 y Arthur Samuel, empleado de IBM y pionero en el campo de los juegos de ordenador y la IA, que escribió el primer programa de ordenador capaz de aprender y acuñó el término. Inevitablemente, también aparece el nombre de Alan Turing.

Sea como fuere, la IA y, en concreto, el aprendizaje automático están viviendo ahora su momento de esplendor. ¿Cuánto hay de burbuja y cuánto de real? ¿Qué aplicaciones ya estamos viendo y cuáles tienen potencial para transformar el mundo?

Para empezar, conviene discernir qué es el aprendizaje automático y qué tiene que ver con la inteligencia artificial. Lo segundo es lo más sencillo de ubicar: el *machine learning* es un tipo de inteligencia artificial, una rama concreta de esta tecnología que, de alguna manera, ha aprendido a aprender, es capaz de absorber una gran cantidad de datos, encontrar patrones entre ellos y sacar conclusiones. "No toda la inteligencia artificial es *machine learning,* pero todo el *machine learning* sí es inteligencia artificial", aclara Jon Ander Gómez, profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la Universitat Politècnica de València y fundador de Solver Intelligent Analytics.

En concreto, Gómez detalla que estos modelos tienen detrás un fundamento matemático estadístico que los hace capaces de aprender a partir de los datos. "Un modelo de *machine learning* es un modelo matemático que ha sido entrenado para realizar una tarea concreta a partir de un amplio conjunto de datos de muestra", define también Manuel Jesús Marín, doctor en Informática y profesor de la Universidad de Córdoba. Esos modelos están formados por "un conjunto de parámetros que hay que ajustar durante el proceso de entrenamiento en función de las muestras usadas", añade Marín.

Parta llevar a cabo ese entrenamiento, "existen diferentes algoritmos, como pueden ser las redes neuronales, los modelos generativos, los clasificadores bayesianos, el *reinforcement* y el *federated learning,* entre otros", explica Angélica Reyes-Muñoz, investigadora de la Universidad Politécnica de Cataluña especializada en vehículos autónomos e IA.

La catedrática de la Universidad de Alcalá María Dolores Rodríguez, que investiga en *machine learning,* lo explica con un ejemplo que incluye visión artificial: "Imaginemos que queremos enseñarle a un ordenador cómo identificar imágenes de perros. En lugar de decirle exactamente cómo es un perro, podemos mostrarle muchas imágenes de perros y

Jon Ander Gómez.

Angélica Reyes-Muñoz.

decirle: estos son perros. Los modelos analizarán las imágenes y encontrarán patrones comunes que definen a un perro, como por ejemplo el hocico y no tener bigotes. Luego usará este conocimiento para identificar perros en nuevas imágenes que nunca había visto".

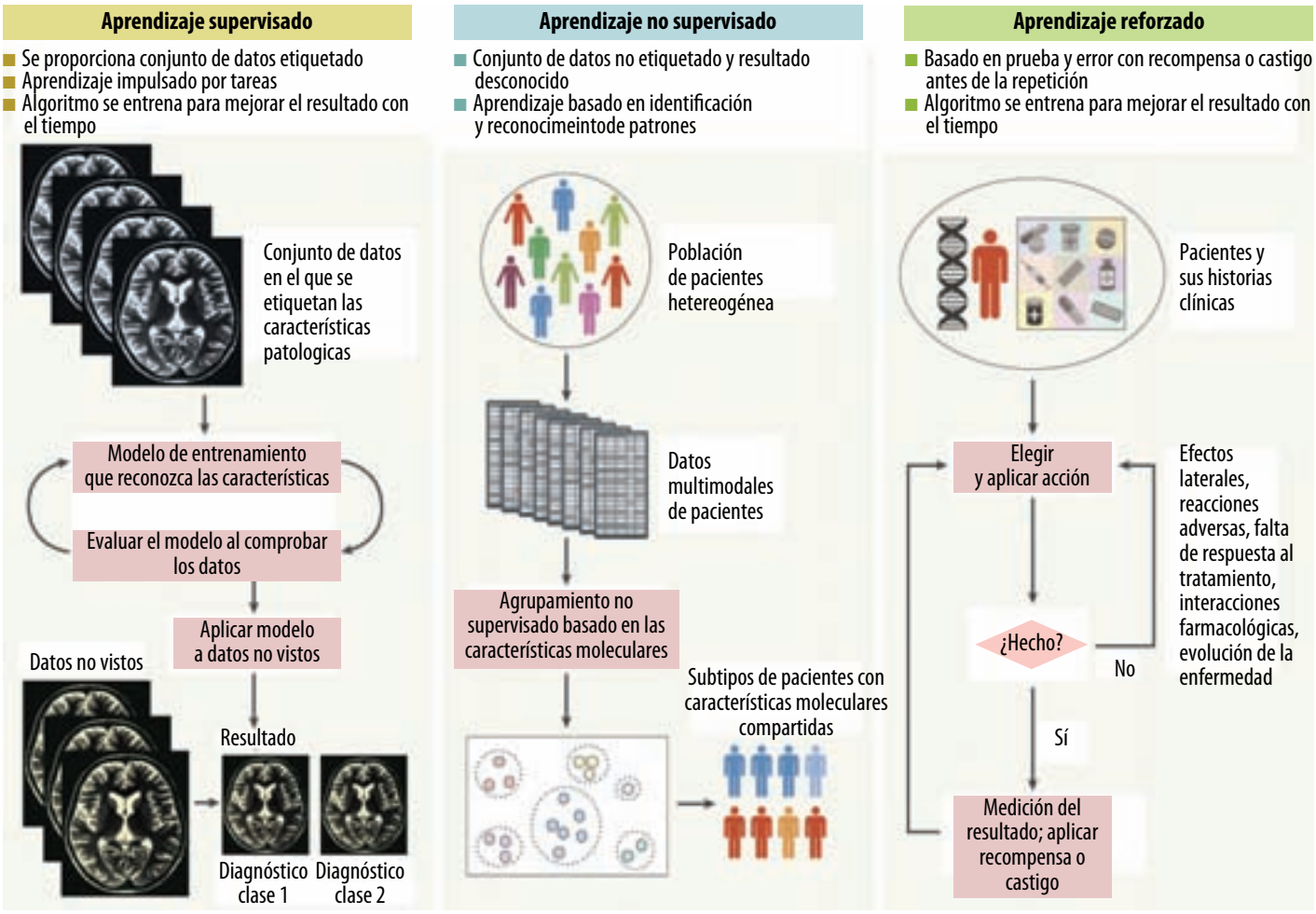
Dentro de los algoritmos de aprendizaje automático hay distintos tipos, diferencia Gabriel Benítez, científico de datos principal de Quant AI Lab. Por un lado, "los algoritmos supervisados, en los que conocemos la variable objetivo y son entrenados a partir de datos etiquetados, y que aprenden a partir de la relación entre las variables dependientes y la variable objetivo". Por otro lado, están "los algoritmos no supervisados, que trabajan con datos no etiquetados y su principal función es encontrar patrones en los datos; los algoritmos no supervisados más comunes son los de *clustering* y algoritmos de recomendación". También existen los semisupervisados, recuerda Marín.

Siempre que utilizamos el verbo aprender hay que pensarlo entre comillas: en realidad, el modelo de IA no entiende lo que está aprendiendo, simplemente es una automatización; no está el aspecto humano del aprendizaje.

El *deep learning*

Otro término que circula en estos tiempos es el *deep learning* o aprendizaje profundo. En este caso, se trata de un tipo de *machine learning,* un subtipo de algoritmos específicos que "se basan en redes neuronales para aprender y extraer características de datos complejos como pueden ser imágenes, textos o sonidos", indica Benítez. Es decir, si imaginamos una serie de conjuntos, el más grande sería la inteligencia artificial, dentro estaría el aprendizaje automático, y dentro de este un subconjunto sería el aprendizaje profundo.

Reyes-Muñoz señala también una diferencia clave: "El *machine learning* aprovecha datos estructurados y etiquetados para hacer predicciones, mientras que los algoritmos de *deep learning* eliminan parte de estas necesidades de preprocesado, ya que pueden trabajar con datos no estructurados y extraer características de forma automatizada". Por



Los tres grandes grupos de algoritmos de aprendizaje automático y sus características.

tanto, no necesitan de la intervención humana para ese etiquetado.

Ahora parece que todo es (o puede ser) inteligencia artificial, que el aprendizaje automático es la panacea que solucionará los problemas de todas las empresas y, claro, se abusa a menudo del término. Sin embargo, los expertos nos recuerdan que debemos alejar tanto *hype* (exageración) del asunto: no dejan de ser matemáticas, operaciones, reglas y datos; y no todo es IA, a veces es estadística o informática.

"El término inteligente se utiliza de forma muy distendida, pero no todo pertenece a la inteligencia artificial. Programar una serie de reglas en una aplicación móvil puede dar la sensación de ser inteligente, pero no hay ni modelos ni algoritmos que lo sustenten, que son aspectos en los que se basa la IA", detalla Rodríguez.

La experta siente que se tiende a pensar en el aprendizaje automático como una solución mágica, que puede resolver cualquier problema sin esfuerzo. Pero, en realidad, "requiere una cuidadosa preparación de datos, ingeniería de características y selección de modelos para lograr buenos resultados; no es una solución rápida, requiere experiencia en el dominio y experimentación iterativa".

Gabriel Benítez.

María Dolores Rodríguez.

La visión de las máquinas

Si las máquinas pueden aprender a identificar imágenes y detectar patrones, ¿significa eso que pueden aprender a ver? Entramos en el área de la visión artificial (*computer vision* en inglés), una subrama de la IA. "El principal objetivo de la visión artificial es que las máquinas sean capaces de comprender, de forma automática, el contenido visual de las imágenes y vídeos", dice Manuel Jesús Marín de la Universidad de Córdoba, que es miembro del grupo de investigación de Aplicaciones de la Visión Artificial. Es decir, que puedan contestar a preguntas como, qué hay en la foto y qué ocurre en la imagen.

De nuevo, esto tiene relación con el aprendizaje automático: "Dentro del campo de la visión artificial existen problemas que pueden ser modelados haciendo uso de técnicas de *machine learning*". Por ejemplo, para clasificar plantas por su flor, las características de una imagen (contornos, texturas, colores) se usarían para entrenar el modelo de IA.

La inteligencia artificial es entonces "el gran paraguas que cubre tanto la visión artificial como el aprendizaje automático: ambos son subcampos de la IA, y la visión artificial puede apoyarse en herramientas de *machine learning* para dar solución a los problemas, pero no siempre", aclara Marín. Por ejemplo, a partir de varias imágenes de una misma escena se puede recuperar la estructura 3D usando geometría (triangulación de los mismos puntos vistos desde diferentes ángulos). "Eso no es *machine learning,* ya que no está 'aprendiendo'. Sucede lo mismo en la otra dirección: hay problemas de aprendizaje automático donde no interviene la visión por ordenador".

La lista de aplicaciones de la visión artificial es larga y creciente: búsqueda visual de imágenes en Google, reconocimiento de señales de tráfico o de matrículas para acceso a aparcamientos, sistemas de reconocimiento biométrico facial para desbloqueo de smartphones, … En muchos casos, tienen un "fuerte componente de aprendizaje automático", por ejemplo, para "asistir en la conducción autónoma y ayudar en tareas como planificación de rutas, toma de decisiones y detección de obstáculos". También en la industria, describe Marín, en líneas de producción para detectar de forma automática defectos en los procesos de fabricación de piezas y separación de productos, y también para mantenimiento predictivo de maquinaria industrial, para identificar posibles desgastes o daños a tiempo. ◗

Manuel Jesús Marín.

"Es cierto que el *machine learning* va a afectar y ya está afectando directamente a la forma en que trabajamos, nos relacionamos, consumimos y hasta jugamos. Pero también es verdad que hay mucho *fake* y mucha exageración sobre cómo esta tecnología puede resolver problemas complejos", considera Rafael Casuso, director general de Tecnología en ThePower Business School.

Benítez coincide: "Creo que uno de los mitos que se ha generado es que el *machine learning* es para todo tipo de empresas, y la verdad es que es necesario tener una infraestructura de datos adecuada antes de poder aplicarlo". Eso sí, subraya, cada vez más compañías y sectores empiezan a implementarlo.

Aplicaciones

¿Cómo y dónde se implementa? Preguntamos a los expertos y expertas y coinciden: sí, hay mucho autobombo, pero también vivimos rodeados de ejemplos prácticos de aprendizaje automático en el día a día, desde los algoritmos de recomendación que utilizan Netflix, Amazon y Spotify a los asistentes de voz, como Siri o Alexa, recuerda Casuso. También en el sector financiero, para realizar transacciones, y en salud para "optimizar el uso de las pruebas diagnósticas y los tratamientos para mejorar la atención al paciente".

También de aplicaciones en salud hablan Gómez y Rodríguez. "Estamos trabajando con el Hospital de la Defensa Gómez Ulla y el Hospital Universitario de Guadalajara en modelos de aprendizaje automático que pueden predecir con bastante precisión el número de pacientes diarios o semanales de ambos hospitales. Esto puede ayudar a gestionar mejor los recursos y reducir las listas de espera", indica la investigadora de la Universidad de Alcalá.

Gómez, de la Universitat Politècnica de València, ha trabajado con *machine learning* para investigar el alzheimer, las

Profesionales del 'machine learning'

Rafael Casuso.

"El mercado laboral está avanzando a pasos agigantados y da pie a nuevos puestos de trabajo con perfiles vinculados al *machine learning*", asegura Rafael Casuso, de ThePower Business School. Y es que el aprendizaje automático no se hace solo: la IA no toma decisiones por sí misma y no decide por su cuenta un buen día que va a aplicarse al estudio del cáncer o a mejorar la logística de una empresa. Detrás debe haber profesionales formados, una especialización que crece a medida que crece su demanda.

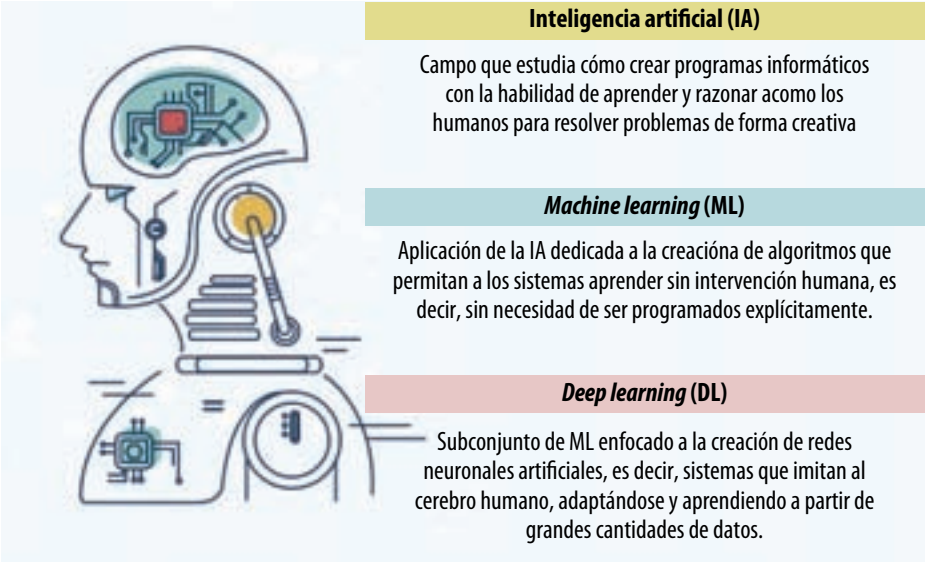
Según el Mapa de profesiones digitales de 2022 elaborado por la escuela de negocios ISDI, en el que analizan las posiciones y áreas más relevantes del entorno digital, los perfiles que utilizan el aprendizaje automático son los de científicos de datos, encargados de analizar grandes volúmenes de información procedentes de diversas fuentes sobre los que aplicarán técnicas predictivas como el *machine learning,* y los especialistas en IA.

Sin embargo, "a las empresas les está costando encontrar a estos profesionales. Digamos que existe una brecha enorme entre lo que las empresas demandan y los perfiles existentes", considera Casuso. No es solo una percepción suya ni de España; de hecho, en el resto de países europeos la situación es más grave.

Según datos de la Oficina Europea de Estadística, Eurostat, de la Comisión Europea, el 32,8 % de las empresas españolas que han contratado talento tecnológico tuvieron problemas para incorporar a ingenieros o programadores a sus plantillas. España es el país mejor posicionado. Arriba, Eslovenia con un 78 %, República Checa con un 77 % y Alemania con un 76,6 % de compañías con dificultades. La media europea es del 62,8 %.

El buen dato de España no coincide con la sensación de empresas y consultoras españolas, que aseguran, como Ca-

IBERDROLA



Diferencias entre inteligencia artificial, machine learning y deep learning.

migrañas y el cáncer. Para las migrañas, usan el análisis de electroencefalogramas, el registro de la actividad bioeléctrica cerebral, para "buscar patrones y observar si hay cambios antes de que el paciente sufra la migraña, para que se pueda tomar la medicación con anticipación, conseguir que no llegue a tener el episodio y acabe teniendo que tomar menos tratamiento". En el caso del cáncer, han entrenado un modelo con imágenes médicas para detectar zonas con mayor actividad metabólica y obtener la probabilidad de que el área corresponda o no a un tumor. "Se entrena un modelo por cada patología objetivo y nos devuelve una probabilidad, a partir de ahí el personal médico es quien puede interpretar ese resultado".

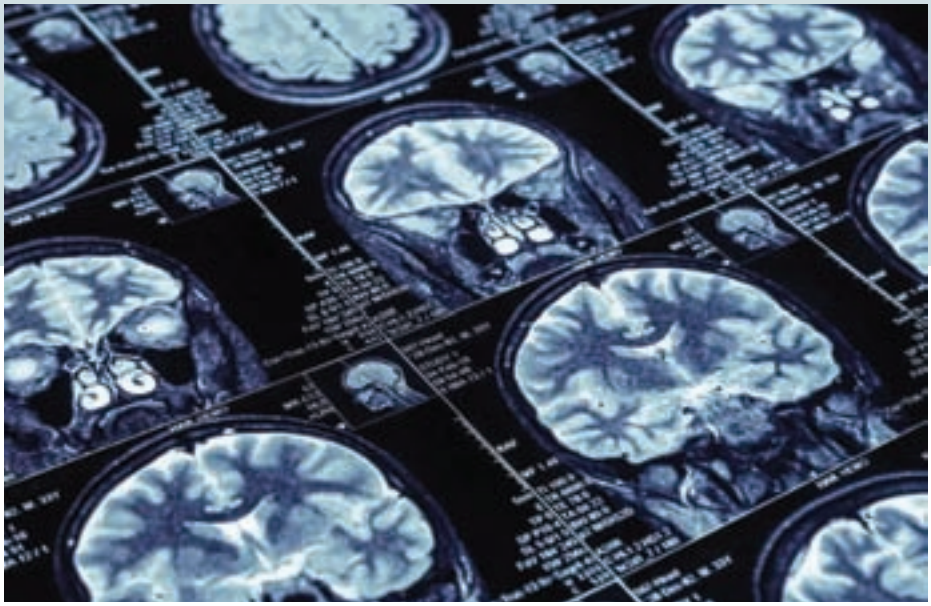
Cambiando de tercio, Benítez incide en usos dentro de la industria, como algoritmos para la detección e identificación de distintos tipos de gases mediante reconocimiento de imágenes satelitales, y la optimización de inventarios utilizando datos históricos. "Otro ejemplo podría ser para estrategias de *pricing* dinámico en el área comercial, es decir, a partir de las características de cada cliente, predecir un precio óptimo", dice.

Dentro de la industria energética, Rodríguez ha trabajado con dos becas Marie Curie gracias al programa GotEnergyTalent (parcialmente financiado por la Universidad de Alcalá y la Unión Europea) y ha investigado sobre modelos de *machine learning* que "pueden ayudar

suso, que muchas de sus vacantes no se cubren y que realmente es un reto encontrar a profesionales.

Donde hay necesidad, hay oportunidad. En general, los perfiles que tienen una base para profundizar en la inteligencia artificial son los que provienen de carreras como matemáticas, ingenierías, informática y estudios relacionados con nuevas tecnologías. Pero Casuso dice que "no solo los perfiles técnicos están formándose, también vemos personas que vienen del mundo de los negocios, operaciones o *marketing* que quieren dar un giro a sus carreras interesándose por los datos, la automatización y los algoritmos". Para formarse se puede recurrir a universidades con másteres especializados y escuelas de negocio que ofrecen estudios en inteligencia artificial, como el caso de ThePower Business School e ISDI. Las opciones cada vez son más amplias. Según Casuso es una formación con muchas salidas, ya que "absolutamente todos los sectores trabajan con grandes cantidades de datos: servicios financieros, comercio minorista, la administración pública, la sanidad... Y, en consecuencia, el *machine learning* puede aplicarse a todos".

Por otro lado, además de la oportunidad también hay quien atisba miedos, precisamente a perder su trabajo. Los expertos coinciden en que algunos empleos se transformarán y que, para seguirle el ritmo habrá que formarse. "Las cosas van a cambiar, pero por supuesto se van a seguir necesitando profesionales, y probablemente más que nunca. Lo que sí cambiará son las habilidades necesarias en esta nueva normalidad", señala Casuso. José Luis Serrano, profesor titular de Tecnología Educativa de la Universidad de Murcia, coincide: "El aprendizaje permanente va a ser la solución porque probablemente nuestro puesto de trabajo cambie muchas veces. Debemos verlo también como una oportunidad".



A través del análisis de miles de imágenes médicas las máquinas aprenden a realizar diagnósticos con una elevada tasa de aciertos.

a la predicción de los consumos energéticos, así como a la predicción de la producción en energías renovables (por ejemplo, parques eólicos o parques fotovoltaicos)". A partir de ahí, "se puede intentar optimizar la oferta y la demanda para ofrecer mejores precios a los consumidores", explica la investigadora.

Otro tema en el que se está utilizando es el de los coches autónomos. Reyes-Muñoz pertenece al grupo de investigación Icarus (Intelligent Communications and Avionics for Robust Unmanned Aerial Systems) de la Universidad Politécnica de Cataluña y cree que pronto "los vehículos autónomos, tanto de tierra como del aire, serán una realidad de la vida diaria en la que convivirán de manera natural la predicción del comportamiento humano y distintos sistemas de inteligencia artificial capaces de interactuar con las innumerables formas en que las personas nos comunicamos con las máquinas", vaticina. También recuerda la importancia del *machine learning* para las *smart cities,* las ciudades inteligentes que, a través de sensores, recopilan millones de datos.

Y de la urbe nos vamos al campo, porque el aprendizaje automático se puede utilizar para la detección de frutos y el mapeo de la producción agrícola. Esto ayuda al agricultor a predecir la cosecha, planificar la campaña de recolección, el almacenamiento y las estrategias comerciales, y también a encontrar las áreas menos productivas de la plantación, descubrir las razones de esta menor producción y proponer soluciones, como detallaron investigadores de la Universitat de Lleida en su artículo "Cómo la inteligencia artificial nos ayuda a contar manzanas", en The Conversation.

Mientras la IA cuenta manzanas, nosotros contamos usos del aprendizaje automático para que la próxima vez que leamos el término en una noticia podamos saber si esta rama de la inteligencia artificial es (o no) *hype.*

Según la OMS, el radón es responsable de entre el 3 y el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón

El enemigo silencioso

El radón es un gas incoloro, inodoro e insípido, que se libera de manera natural de algunas rocas tan habituales como el granito. Químicamente pertenece al grupo de los gases nobles, aunque, como dice el catedrático Luis Quindós, "es noble pero sus hijos son unos villanos". Y es que se trata de un gas radiactivo cuya desintegración genera otros elementos radiactivos perjudiciales para la salud. Es un enemigo silencioso que se cuela en los edificios y se acumula en sótanos de las zonas donde se genera, y lo hace de forma sigilosa, pasando inadvertido para las personas. Por ello, la preocupación por su presencia y sus efectos ha crecido en los últimos años y España prepara un Plan Nacional Contra el Radón, que completará la trasposición de una Directiva europea.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | periodista de ciencia ■

Entre el 3 y el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón se deben al radón, advierte la Organización Mundial de la Salud (OMS). En España, supondría una media de 1.500 defunciones al año, que superan las 1.145 vidas que se quedaron en la carretera en 2022. Todo "un problema de salud pública", alerta el organismo internacional. Sin embargo, "la incertidumbre es tan grande que, aunque sí es necesario que haya más conciencia y acción política, no se debe causar alarma social", matiza Luis Quindós, catedrático de Radiología y Medicina Física de la Universidad de Cantabria y coautor de los datos que maneja la OMS.

El radón es hijo del uranio y el radio, presentes de manera natural en rocas tan comunes dentro y fuera de casa como el granito. A diferencia de sus padres, el radón es un gas. Es radiactivo, incoloro, inodoro e insípido, por lo que es indetectable a simple vista (u olfato). A cielo abierto su concentración es muy baja pero cuando se cuela por grietas y agujeros de edificios, como pesa más que el aire, se acumula

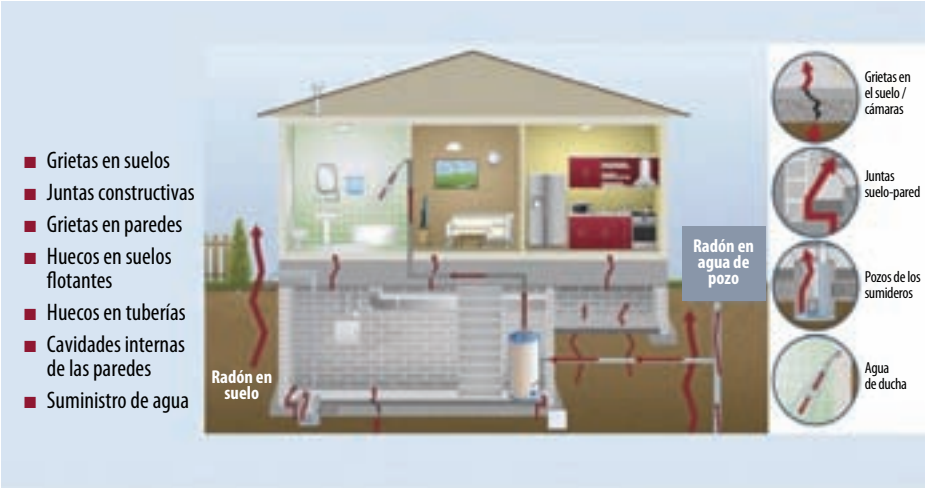
en sótanos y garajes mal ventilados. Ahí, lo respiramos.

Aunque nuestro protagonista es el que tiene mala fama, no es el verdadero causante de los estragos en el organismo, sino que los culpables son sus descendientes. Es cierto que el radón emite partículas alfa, pero permanece tan poco tiempo en nuestro sistema respiratorio —cogemos aire y lo soltamos entre 12 y 20 veces por minuto— que el efecto de su radiación ionizante es prácticamente cero.

El problema reside en que el efímero radón —cuya vida media es de apenas 3,8 días— se desintegra en polonio 218 y 214, plomo 214 y bismuto 214. Que son sólidos y también radiactivos. Y pequeños. Tanto que quedan fuertemente vinculados a las partículas de 0,1 micras contenidas en el aire y que penetran en el tracto pulmonar, desde donde van irradiando y modificando estructuras celulares. Ocasionando, eventualmente, un tumor en el pulmón.

El nexo con este tipo de cáncer está claro, pero no así con otro tipo de enfermedades, como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA), que también se le achaca al radón. "En el resto de afecciones no hay un mecanismo biológico-químico-físico que relacione tan claramente la causa con el efecto", enfatiza el médico. Sin embargo, algunos investigadores señalan como posible vector el agua con radón concentrado, de origen subterráneo.

Para que el radón dañe otros órganos distintos del respiratorio, tendría que viajar disuelto en nuestra sangre y a medida que se degradara en el torrente sanguíneo, sus descendientes se irían alojando en diferentes partes del organismo, desde donde podrían dañar sus tejidos. Pero esto no sucede así. Como explica Quindós, "este gas se comporta como el cloro que se echa a la piscina o como el dióxido de carbono de la gaseosa, que pasa a estado gaseoso en cuanto está en contacto con la atmósfera o se abre la botella". De hecho, en lugares como balnearios, donde las fuentes de origen subterráneo suelen contener mucho radón, éste pasa al aire y la incidencia en sus trabajadores sigue siendo de cáncer de pulmón.



El radón puede entrar en una vivienda de muchas maneras.

El peaje de la eficiencia

"El radón ha existido siempre y, sin embargo, ahora hay más riesgo de respirarlo que hace 70 años", puntualiza Quindós. La razón es que, con la búsqueda de la eficiencia energética, se han impermeabilizado fachadas y se han colocado ventanas herméticas, lo que ha disminuido drásticamente la ventilación de los edificios. Además, a medida que se ha encarecido el metro cuadrado de terreno, la gente ha excavado sótanos para aprovechar el espacio. "Construir encima de un bloque de granito es seguro porque de él sale muy poco radón. Ahora bien, si se perfora y rompe la roca, en el polvo producido el gas encuentra un camino más fácil para moverse", explica este investigador. Y concluye: "las casas de las abuelas estaban apoyadas sobre el suelo, no dentro de él, y estaban muy aireadas porque ninguna de las cristaleras cerraba bien. Eso, sí, se pasaba frío".

Luis Quindós.

A María Luisa Rodríguez le hubiera venido bien hablar con Luis Quindós antes de mudarse a un chalé de la sierra madrileña. Al poco de llegar, se quedó embarazada y se bajó al sótano para dormir sin tanto sofoco. Tres meses pasó al fresco hasta que un vecino le sugirió que hiciera una prueba de radón. "Y empecé a ponerme nerviosa". Ella, médica de atención primaria, sabía los riesgos, así que dispuso unos detectores por toda la planta baja que parecían fundas de antiguos carretes fotográficos.

Estos cilindros metálicos acumulan el radón presente en la estancia y su interior está recubierto por una capa de reactivo que se ve dañado por las partículas alfa del gas. Y aunque hay medidores digitales que dan el resultado *in situ,* "lo más fiable es utilizar los detectores que proporcione un laboratorio

que la ENAC (Entidad Nacional de Acreditación en España) haya acreditado según la ISO 17025", dice Marta García-Talavera, jefa del área de Radiación Natural de la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Los detectores arrojaron un dato incómodo: 2.000 bequerelios por metro cúbico. Los Bq/m^3 expresan el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire y, en este caso, superaban en más de seis veces los 300 Bq/m^3 marcados como el límite máximo recomendado en la Directiva europea de protección contra los peligros de las radiaciones ionizantes (59/2013/EURATOM). No por esperado, menos doloroso, asegura el dicho. "Me alarmé, me sentí culpable por si podía afectar al feto y vivo con intranquilidad", se lamenta Rodríguez. En unos años, quizás se acojan a las subvenciones que ofrecen algunas administraciones para la realización de obras de impermeabilización y de canalización del gas hacia el exterior. Pero,

Detector de radón.

Marta García-Talavera.

hasta entonces, las ventanas de su bodega están permanentemente abiertas, llueva o nieve.

La casa de Rodríguez se sitúa en Galapagar, un municipio que está en ese 20 por ciento del territorio español con más concentración de este intruso silencioso, según el "Mapa del potencial de radón de España", que elaboró el CSN en 2017 (www.csn.es/eu/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana). Ahora, más de un lustro después, el organismo regulador actualizará y mejorará esta cartografía, y coordinará nuevas mediciones de radón a escala regional o local para integrarlas. Esta es una de las medidas estrella del futuro Plan Nacional Contra el Radón, una hoja de ruta con acciones concretas para reducir el impacto del gas sobre la población. Entre otras cosas, prevé que el CSN también estudie la contribución del agua corriente y de los materiales de construcción a la calidad interior del aire. Y le encargará la mejora de la fiabilidad

Un contaminante hogareño más

El fomento de la eficiencia energética de los edificios no solo aumenta la concentración de radón dentro de ellos, sino también el de otros muchos contaminantes que proceden de los materiales de construcción, de pinturas, acabados y barnizados. Respiramos formaldehidos, aceites, querosenos… cuyo efecto en nuestra salud es todavía impreciso. "La calidad interior es un tema pendiente en España: falta muchísima conciencia, formación y legislación", cuenta Luis Quindós, catedrático de Radiología y Medicina Física de la Universidad de Cantabria.

Este investigador lleva cuatro décadas trabajando con el radón y casi el mismo tiempo reclamando que se equipare al resto de elementos químicos nocivos. Facilitaría que la sociedad tomara consciencia de que, a veces, "tiene más impacto en nuestra salud el tiempo que pasamos en casa que el hecho de que esté cerca de una central nuclear". Pero este gas es radiactivo y la percepción de la gente —y de los políticos— genera alarma social que centra la atención en medir, impermeabilizar e, incluso, mudarse de casa. Y obvia algo tan básico como la aireación, que no solo soluciona en la mayoría de los casos los problemas de radón, sino del resto de venenos que hay en nuestros hogares", concluye Quindós.

El granito es una de las rocas que mayor cantidad de radón generan.

de las mediciones para que no estén tan condicionadas por las condiciones ambientales, ya que los detectores arrojan resultados distintos en función de diferentes factores; por ejemplo, una elevada humedad, como ocurre en los balnearios. Este trabajo continúa uno de 2022 del CSN, con García-Talavera como coautora (https://bit.ly/3OhqSJQ).

Disponer de información de base detallada es "fundamental para diseñar medidas efectivas", recalca la experta. Por ejemplo, el mapa de radón ha sido clave en el diseño de la modificación que se hizo en 2019 del Código Técnico de la Edificación; en concreto, en la Sección HS6, que hace referencia al radón. También, se ha utilizado para obtener

el listado de los llamados municipios de actuación prioritaria, en los que habría que llevar a cabo actuaciones de forma preferente.

Próxima publicación

El problema que tiene el plan es que todavía no hay plan, aunque parece que se publicará pronto, según García-Talavera: "ya está hecho y sus actuaciones elaboradas, a falta de los últimos trámites antes de su aprobación final por el Consejo de Ministros". Esta experta en radón del CSN ha participado activamente en el desarrollo del texto. Y, aunque a nivel reglamentario la transposición de la directiva es "ambiciosa y suficiente", lamenta que "llega tarde". España no transpuso la norma europea hasta el pasado febrero —cinco años más tarde de lo exigido (ya que el plazo venció en 2018)— lo que le ha valido amonestaciones desde la Unión Europea. Y, además, lo hizo de manera incompleta, pues aún no ha cumplido con la obligación de diseñar e implantar ese plan estatal.

Simposio Nacional sobre Protección frente a la Exposición al Radón en el Entorno Laboral, celebrado en 2022 en la Universidad de Santiago de Compostela.

Mientras se publica o no el plan, el nuevo reglamento sigue sus plazos y amplía, como le exige Europa, el ámbito de actuación contra el radón. Por primera vez, se tendrá que medir su concentración en todos los lugares de trabajo que estén en planta baja o sótano de los municipios de actuación prioritaria: administraciones, colegios, cuevas turísticas, balnearios, minas subterráneas... Esto supone, entre otras cosas, que a partir de mediados de 2024 "se multiplicará por varios miles el número de lugares de trabajo a vigilar", dice García-Talavera. Para poder abordarlo, añade, "el CSN establecerá un convenio de colaboración con la Inspección de Trabajo y Seguridad Social (ITSS)".

La Directiva europea señala que las actuaciones para mejorar la calidad del aire en el interior deben combinarse con medidas de información sobre el radón a la población. En esta línea, el organismo regulador apoyó el pasado año el primer Simposio Nacional sobre Protección frente a la Exposición al Radón en el Entorno Laboral, organizado por la Universidad de Santiago de Compostela con carácter divulgativo. También está financiando un proyecto de investigación para conocer cuál es la concienciación de la sociedad acerca del radón. Se están haciendo encuestas en todo el territorio, incluyendo las zonas más expuestas y también las más alejadas, para determinar cuál es la línea base. En opinión de García-Talavera, "aunque es un problema más conocido que hace unos años, gracias a que en los medios de comunicación se le está dedicando más atención, estamos expectantes ante los resultados, que se estima que estarán disponibles el año que viene. Gracias a ellos esperamos poder diseñar acciones de comunicación más eficaces desde el Plan Nacional".

El nuevo marco normativo adoptado en España es "amplio, suficiente y completo" y el reto ahora reside en llevarlo a la práctica para implementarlo de manera correcta, concluye la experta del CSN.

Riesgos mutiplicados

En España el número total de cánceres de pulmón al año ronda los 20.000. Y el tabaco es el principal responsable. Le sigue, muy de lejos, el radón. Es tan grande el efecto del tabaco que si se dejase de fumar se reduciría drásticamente la incidencia de esta enfermedad y la residual se debería ya solo a este gas y otras causas.

El problema viene cuando se combina el efecto de los dos. "En los fumadores, el radón multiplica la probabilidad de que desarrolle un cáncer de pulmón del orden de entre 30 y 40 veces más", explica Luis Quindós, catedrático de Radiología y Medicina Física de la Universidad de Cantabria.

Experior de la central nuclear Almaraz.

Eficacia de los PAR en centrales PWR-W con contención seca

En las centrales nucleares de agua ligera, los denominados accidentes severos generan una gran cantidad de gases combustibles (H_2 y CO) que se distribuyen por todo el recinto de contención. Su combustión incontrolada podría ocasionar la rotura del recinto y la subsecuente liberación de significativas cantidades de productos de fisión al exterior. A raíz del accidente de Fukushima, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) requirió la instalación de los llamados PAR en las centrales nucleares españolas de diseño norteamericano, para reducir la posibilidad de este modo de fallo de la contención.

Este artículo presenta la eficacia de los PAR en una central PWR-W genérica de tres lazos con contención seca. Para acometer esta tarea, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) realizó para el CSN una serie de cálculos con el código MELCOR. Desarrollado por la USNRC para estudiar la progresión de un accidente severo, MELCOR es empleado por el CSN en sus evaluaciones independientes de seguridad en el campo de los accidentes severos.

Estos cálculos con MELCOR muestran que los PAR son muy eficaces para evitar combustiones incontroladas de H_2 y CO, en caso de que la distribución de gases en la atmósfera de la contención sea suficientemente homogénea. También han permitido conocer la incidencia que tendría la activación del sistema de extracción de calor de la contención, así como las importantes dependencias de los modelos de planta (nodalización del recinto de contención, composición del hormigón, etc.).

■ Texto: **Fernando Robledo Sanz** | Área de Modelización y Simulación del CSN ■

Si se produjera un accidente severo en un reactor de agua ligera, se generaría una gran cantidad de gases combustibles, en concreto H_2 y CO. El H_2 se genera por la oxidación de la vaina de combustible (en la denominada fase *in-vessel*) y por la interacción del corium descargado desde la vasija con el hormigón de la cavidad de reactor (en la denominada fase *ex-vessel*). El CO sólo se genera en la fase *ex-vessel,* también por la interacción del corium con el hor-

Tabla 1. Masa inicial de materiales en el núcleo y en el *plenum* inferior*

Material	Masa inicial (kg)
Dióxido de uranio	82.000
Zircaloy	17.000
Acero inoxidable (74% Fe, 18% Cr, 8% Ni)	35.000
Plata-Indio-Cadmio	2.500

*Los datos de esta tabla son aproximados para salvaguardar la confidencialidad.

migón. La combustión incontrolada de estos gases podría originar importantes aumentos de presión y temperatura dentro del recinto de contención que pueden llevar a su ruptura y, a continuación, a una significativa liberación de productos de fisión al exterior.

Tras el accidente de Fukushima, el CSN requirió a todas las centrales nucleares españolas de diseño norteamericano que instalasen los denominados recombinadores autocatalíticos pasivos (PAR, por sus siglas en inglés). Estos dispositivos aumentan la seguridad de las plantas porque eliminan de forma controlada el H_2 y el CO generados durante un accidente severo, reduciendo así el riesgo de su combustión incontrolada. La referencia 1 describe el funcionamiento de los PAR.

Dentro de un convenio de colaboración entre el CSN y el Ciemat en el área de los accidentes severos que estuvo vigente entre los años 2014 y 2018, Ciemat realizó para el CSN una serie de cálculos independientes con el código MELCOR (ref. 2 y 3) sobre la eficacia de los PAR en centrales PWR de tres lazos diseñadas por Westinghouse y equipadas con contención seca (ref. 4). El código MELCOR ha sido desarrollado por la USNRC para estudiar la progresión de un accidente severo y es el empleado por el CSN en sus evaluaciones independientes en el campo de los accidentes severos. Los principales resultados obtenidos en este estudio se recogen en este artículo. Además, el trabajo de Ciemat muestra la importancia del empleo de herramientas analíticas en las evaluaciones de seguridad nuclear (ref. 5).

1. El modelo de planta

Como ya se señaló en el apartado anterior, se ha tomado como referencia una central genérica PWR de tres lazos de diseño Westinghouse y equipada con contención seca. Se ha adaptado a la versión más moderna de MELCOR 2.1, un modelo de esta planta disponible en el CSN.

1.1. El modelo del núcleo y del sistema de refrigeración del reactor

En el código MELCOR, el modelo de la vasija del reactor necesita dos tipos de nodalizaciones: una específicamente dedicada a la degradación del núcleo y la otra para el cálculo de la evolución de las variables termohidráulicas del fluido refrigerante. Para estudiar la degradación del núcleo, su parte activa se divide en 3 nodos radiales y 10 nodos axiales. Hay que añadir cuatro nodos axiales: dos para el plenum inferior de la vasija y otros dos para la parte de los elementos combustibles situados, respectivamente, debajo del BAF y encima del TAF. Además, hay un cuarto nodo radial para tener en cuenta la conexión del downcomer con el plenum inferior de la vasija. Para los cálculos termohidráulicos, la vasija del reactor se ha dividido en 5 nodos: canal, bypass, downcomer, plenum inferior y plenum superior.

El sistema de refrigeración del reactor se modela con 11 volúmenes de control que representan los lazos de refrigeración. La tabla 1 muestra el inventario inicial de materiales en el núcleo. Con estos datos, la oxidación del 100% del Zircaloy produciría unos 786 kg de H_2, mientras que la oxidación de todo el acero inoxidable produciría del orden de 1.400 kg de H_2.

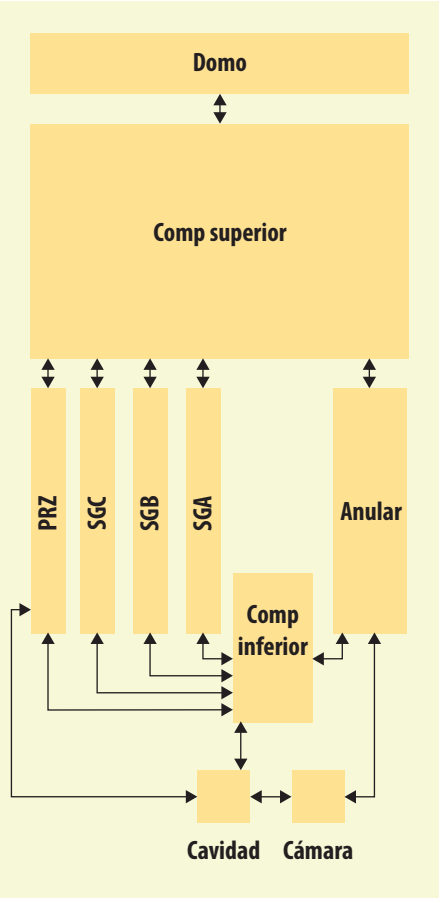


Figura 1. Nodalización del recinto de contención.

1.2 La nodalización de la contención y la distribución de los PAR

El recinto de contención se ha modelado con 10 nodos (figura 1) y se han incluido dos tipos de PAR, que en este artículo se denominarán PAR-A, el utilizado para los cálculos base, y PAR-B, cuya eficacia se analizará explícitamente en un estudio de sensibilidad. Sus tasas de remoción de H_2 y CO fueron proporcionadas por las centrales nucleares españolas, como información confidencial y se incluyeron en el modelo de MELCOR 2.1.

La tabla 2 muestra el volumen de

cada nodo y la localización de los PAR empleada en este estudio.

1.3. El modelo para la interacción núcleo fundido-hormigón

Se ha modelado una sola cavidad y todos los materiales que intervienen en la interacción núcleo fundido-hormigón están agrupados en una sola capa, es decir están homogéneamente mezclados. La temperatura de ablación de hormigón se ha establecido en 1.500 K y se han empleado dos tipos de hormigón: uno para los casos base y otro para un estudio de sensibilidad. El tipo de hormigón empleado en los cálculos es de tipo calizo. La tabla 3 detalla los componentes más relevantes de estos dos tipos de hormigón.

1.4 Límites de inflamabilidad

Se considera que se produciría una combustión cuando las fracciones molares de los gases referenciados abajo cumplan:

$$X_{H2} + X_{CO} > 0{,}09$$
$$X_{O2} > 0{,}05$$
$$X_{vapor} < 0{,}60$$

2. Secuencias de accidentes severos analizadas

Se analizaron cuatro secuencias de accidentes severos. Las siguientes subsecciones describen los resultados más significativos.

2.1 Secuencia SBLOCA3

El suceso iniciador es una rotura de 2" en la rama fría. Además, fallan los siguientes sistemas de seguridad: sistema de refrigeración de emergencia del núcleo, sistema de agua de alimentación auxiliar y sistema de rociado de la contención. Está operable el sistema de ventilación de emergencia de la contención (fan-coolers) y la cavidad del reactor está seca. Los cálculos muestran que la actuación de los fan-coolers mantiene la presión de la contención por debajo de su presión de diseño y que la distribución de los gases en la contención se mantiene bastante uniforme.

Los cálculos sin PAR muestran que se exceden los límites de inflamabilidad en todos los nodos de la contención desde el momento de la rotura de la vasija (5,78 horas) hasta el final del cálculo (50 horas). Los cálculos con PAR, distribuidos como señala la tabla 2, concluyen que sólo se exceden los límites de inflamabilidad en la cavidad y en la cámara durante un período de unas 5 horas después de la rotura de la vasija.

La eficacia de los PAR para la secuencia SBLOCA3 se recoge en la tabla 4.

2.2 Estudios de sensibilidad para la secuencia SBLOCA3.

Los resultados más relevantes de los numerosos estudios de sensibilidad realizados para esta secuencia se presentan a continuación.

2.2.1 PAR tipo B vs PAR tipo A

Cuando se emplean los PAR-B, los cálculos muestran que apenas cambia la fracción molar de los gases combustibles en los diferentes nodos de la contención,

Tabla 2. Volúmenes de los nodos de la contención y localización de los PAR

Nodo	Porcentaje	Nº de PAR
Cavidad	0,72%	0
Cámara	0,63%	1
Compartimento PRZ	0,53%	1
Compartimento SG-C	0,96%	1
Compartimento SG-A	1,84%	1
Compartimento SG-B	1,84%	1
Compartimento Inferior	3,46%	1
Anular	9,45%	1
Domo	14,92%	3
Compartimento Superior	65,65%	12
Total	**100%**	**22**

Tabla 3. Componentes más relevantes de los dos tipos de hormigón empleados en este estudio*

	Casos base	Hormigón 2 (estudio de sensibilidad)
Componente	Fracción másica	
SiO_2	0,43	0,44
CaO	0,25	0,23
CO_2	0,10	0,09
H_2O	0,08	0,03

Tabla 4. Cantidades de H_2 y CO eliminadas por los PARs en la secuencia SBLOCA3

Nº de PAR	H_2 generado (kg)	H_2 extraído por PAR (kg)	porcentaje	CO generado (kg)	CO extraído por PAR (kg)	porcentaje
22	2.220	1.400	63%	15.943	6.200	39%

por lo que se mantienen las conclusiones sobre la inflamabilidad de los gases combustibles en la contención.

2.2.2 Sensibilidad a la composición del hormigón: el hormigón 2

Para este estudio de sensibilidad, se empleó el hormigón 2 de la tabla 3, que tiene menos contenido de agua que el del análisis inicial. La tabla 5 muestra las diferencias obtenidas en este estudio de sensibilidad en lo que se refiere a los gases generados en la fase ex-vessel.

La explicación de esta disparidad es la siguiente. La principal diferencia entre los dos hormigones es el contenido de agua. En cambio, tienen la misma cantidad de CO_2. Por tanto, la tasa de generación de vapor de agua es menor en el caso del hormigón 2 y, en consecuencia, también lo es la tasa de generación de H_2, que se produce por la oxidación de los metales del corium por el agua. Además, el tiempo necesario para oxidar los metales es mayor. En cambio, al ser similar la cantidad de CO_2, la tasa generación de CO por oxidación de los metales del corium es similar en ambos casos, aunque dura más tiempo con el hormigón-2.

Los cálculos muestran que, en relación con el caso base, la fracción molar de H_2 en la contención es significativamente menor, mientras que la fracción molar de CO es mayor. Sin embargo, no se exceden los límites de inflamabilidad.

2.2.3 La nodalización de la contención

Se corrieron varios casos modelando la contención sólo con 4 nodos. Los cálculos arrojaron significativas diferencias en la fase ex-vessel del accidente. En el modelo con 4 nodos, la distribución de gases presenta significativas inhomogeneidades entre los diferentes nodos, lo que hace que la fracción molar de H_2+CO exceda los límites de inflamabilidad en los cuatro nodos, incluso con la presencia de PAR. Así, en el domo se superan los límites de inflamabilidad entre las 6,6 y las 9 horas.

2.2.4 Estudios de sensibilidad orientados a variar la cantidad de hidrógeno generado en la fase in-vessel

También en este ámbito se han realizado numerosos estudios de sensibilidad, siguiéndose las recomendaciones de la ref.6. En ninguno de los casos se han alterado las conclusiones sobre la superación de los límites de inflamabilidad y apenas ha aumentado (o disminuido) la cantidad de hidrógeno generado en la fase in-vessel. Se enumeran algunos de los cálculos de sensibilidad realizados.

- **Formación de eutécticos para el UO_2 y ZrO_2**
  La cantidad de hidrógeno generado en la fase in-vessel descendió un 5 %.
- **La pérdida de resistencia mecánica de la vaina se modela siguiendo las recomendaciones del estudio SOARCA (ref. 6)**
  Sólo aumenta un 2 % la generación de H_2.
- **Uso de la correlación de Pratter-Courtright para la oxidación del Zr**
  Se modificó el caso base que utilizaba la correlación de Urbanic-Heidrick. La generación de H_2 disminuye en un 13 %.
- **Bloqueo total o parcial de un anillo del núcleo**
  Sólo disminuye un 3 % la generación de H_2.
- **Activar la opción de usar un coeficiente de transmisión de calor entre el debris y el agua en el plenum inferior de la vasija**
  Esta es la opción que más H_2 genera en la fase in-vessel: un 10 % más que el caso base.
- **Caso que incluyó todas las modificaciones recomendadas por el estudio SOARCA (upgraded case) (ref. 6)**
  No se obtuvieron diferencias significativas respecto del caso base.

Tabla 5. Gases generados en la fase *ex-vessel* de la secuencia SBLOCA3 para los dos tipos de hormigón

Gases generados (Kg)	Hormigón 2	Caso Base	Diferencia
H_2	1.340	1.804	- 26%
CO	28.543	15.943	+79%
H_2O	3.331	21.449	- 84%
CO_2	8.694	21.182	- 59%

2.3 Secuencia SBLOCA4

Este accidente severo se inicia con una rotura de 2" en la rama fría y fallan: el sistema de refrigeración de emergencia del núcleo, los sistemas de agua de alimentación auxiliar y los fan-coolers. En cambio, funciona el sistema de rociado de la contención. La cavidad del

Tabla 5. Cantidades de H2 y CO eliminadas por los PAR en la secuencia SBLOCA4

Nº de PAR	H_2 generado (kg)	H_2 extraído por PAR (kg)	porcentaje	CO generado (kg)	CO extraído por PAR (kg)	porcentaje
22	2.180	1.386	63,5%	14.707	5.714	38%

Tabla 6. Cantidades de H_2 y CO eliminadas por los PARs en la secuencia SBLOCA4

Nº de PAR	H_2 generado (kg)	H_2 extraído por PAR (kg)	porcentaje	CO generado (kg)	CO extraído por PAR (kg)	porcentaje
22	2.180	1.386	63,5%	14.707	5.714	38%

Tabla 7. SBO: distribución de los 9 PAR en el recinto de contención que evitan sobrepasar los límites de inflamabilidad

Nodo	Número de PAR
Cámara	1
Compartimento inferior	1
Compartimento anular	1
Compartimento uuperior	5
Domo	1

reactor está inundada como estrategia de gestión de accidentes severos. La inundación de la cavidad se inicia cuando la temperatura en el plenum superior de la vasija alcanza sobre los 920 K y la tasa de inyección de agua es del orden de 20 kg/s.

MELCOR predice que la contención falla por sobrepresión antes de las 50 horas del cálculo, concretamente a las 47,7 horas. La inundación de la cavidad y la actuación del rociado hacen que la cavidad, el compartimento anular y el inferior están parcialmente inundados, lo que afecta a los caminos de flujo entre estos nodos y, además, se observa que:

- La tasa de erosión del hormigón es más baja que en el caso de cavidad seca.
- Hay una clara inhomogeneidad en la distribución de los gases en la contención.

Los cálculos con MELCOR indican que sin PAR en la contención se alcanzarían los límites de inflamabilidad en varios compartimentos. En cambio, la presencia de PAR elimina la posibilidad de que se alcancen los límites de inflamabilidad, excepto en el compartimento anular, debido a que el flujo de gases a este compartimento es muy alto cuando se rompe la vasija, lo que impide que los PAR eliminen los gases combustibles a la velocidad necesaria.

La tabla 6 muestra la eficacia de los PAR en esta secuencia.

2.4 SBO

En esta secuencia hay una pérdida total de corriente eléctrica y no funciona ningún sistema de seguridad.

Los cálculos de MELCOR sin PAR concluyeron que hay una distribución bastante uniforme de los gases en toda la contención, con la excepción de la cavidad y la cámara durante 1,5 horas después de la rotura de la vasija. La concentración de vapor en estos dos nodos es muy superior a la de los demás nodos de la contención debido a su pequeño volumen libre y a la gran cantidad de vapor que produce la interacción núcleo fundido-hormigón. El compartimento anular está siempre inertizado por la presencia de vapor, pero en el resto de los nodos se alcanzan los límites de inflamabilidad. El estudio de esta secuencia puso de manifiesto que estos cálculos con MELCOR tienen una fuerte dependencia de los límites de inflamabilidad elegidos (sección 2.4). Así, si se hubiese elegido una fracción molar de vapor por debajo del 55 %, muy frecuente en otros estudios, el tiempo en el que se superan los límites de inflamabilidad se reduciría en muchos nodos y desparecería en algunos (p. ej. en el domo y en el compartimento superior).

Los resultados obtenidos con MELCOR señalan que 9 PAR con la distribución de la tabla 7 son suficientes para evitar que se alcancen los límites de inflamabilidad en cualquier nodo.

La tabla 8 muestra la eficacia de los PAR en el SBO.

Tabla 8. Cantidades de H_2 y CO eliminadas por los PARs en la secuencia SBO

Nº de PAR	H_2 generado (kg)	H_2 extraído por PAR (kg)	porcentaje	CO generado (kg)	CO extraído por PAR (kg)	porcentaje
0	2.176	0	0%	14.393	0	0%
9	2.176	949	43,6%	14.393	3,665	25,4%
22	2.176	1.331	61,1%	14.393	5.374	37,3%
24	2.176	1.346	61,8%	14.393	5.546	38,5%
26	2.176	1.375	63,2%	14.393	5.666	39,3%

3. El efecto de la activación del sistema de extracción de calor en la contención

La activación del sistema de extracción de calor de la contención en una central PWR con contención seca elimina vapor del recinto y podría originar la combustión incontrolada de los gases combustibles generados en un accidente severo. El diseño del sistema de extracción de calor de la contención considerado en estos cálculos se compone del sistema de rociado de la contención (que sólo enfría en la fase de inyección de un accidente base de diseño) y los fan-coolers. Ciemat analizó la incidencia en un SBO de la activación del sistema de rociado de la contención a las 5h, 8h y 24h.

El primer efecto de la activación del rociado de la contención es posponer el momento de fallo de la contención por presurización cuasi-estática hasta después de las 50 horas que dura el cálculo. Además, el funcionamiento del sistema de rociado de la contención favorece el flujo de agua desde el compartimento superior a la cavidad, lo que hace descender la tasa de erosión del hormigón y, por tanto, disminuye la velocidad de generación de gases combustibles en la fase ex-vessel. Este descenso es sólo moderado: un 10 % en el caso del H_2 y un 15 % en el caso del CO.

Otras conclusiones de estos cálculos son las siguientes:

- El caso más relevante para la seguridad corresponde a la activación del sistema de rociado de contención a las 8 horas de comenzado el SBO. Sin PAR en el recinto de contención, varios nodos alcanzan los límites de inflamabilidad. La instalación de 16 PAR impediría que se alcanzasen los límites de inflamabilidad en cualquier nodo de la contención.
- La puesta en marcha del rociado a las 5 horas de comenzado el accidente queda cubierto por el caso anterior.
- La activación del rociado a las 24 horas no daría lugar a combustiones con o sin presencia de PAR.

Una vez localizado el caso más relevante para la seguridad, se analizó la incidencia del caudal del rociado. Los casos estudiados fueron:

- El rociado funciona con el caudal nominal (el caso ya descrito anteriormente).
- El rociado funciona con el 50% del caudal nominal.
- El rociado funciona con el caudal nominal, pero el inventario del tanque de almacenamiento de agua para la recarga es del 50 %.
- El caudal del rociado es el 50% del nominal y el inventario del tanque de almacenamiento de agua para la recarga también es el 50 % del nominal.

Los resultados concluyen que no se alcanzan los límites de inflamabilidad en ningún nodo, si hay un número suficiente de PAR contención.

3.1 Otros estudios de sensibilidad

El CSN profundizó en el estudio de las consecuencias de la activación del sistema de extracción de calor de la contención en caso de SBO. En concreto, se analizaron las consecuencias de la activación de este sistema a las 8, 9, 10, 11 y 12 horas después de iniciado el SBO (ref. 7). Los casos estudiados y las principales conclusiones se describen a continuación.

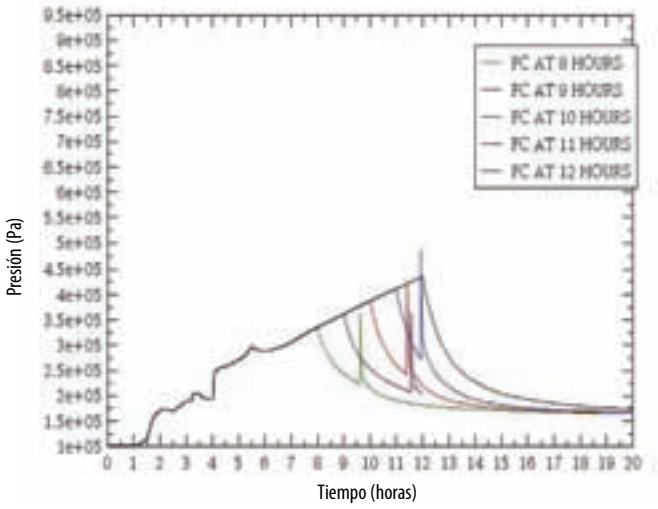


Figura 2. Evolución de la presión en la contención en caso de SBO, con presencia de PAR y activación de los fan-coolers en diferentes instantes

3.1.1 Activación del sistema de rociado de la contención con el 20 % del caudal nominal

La contención siempre estuvo inertizada.

3.1.2 Activación del sistema de rociado de la contención con el caudal nominal

Según los cálculos con MELCOR, tampoco hay combustiones en este caso.

3.1.3 Activación de los fan-coolers

Este fue el escenario envolvente. Como se aprecia en la fig. 2, sí se produjo la deflagración de los gases combustibles y la presión en la contención superó su presión de diseño en algunos casos, pero se mantuvo por debajo de la presión de fallo de la contención (del orden de 8 bares para nuestro caso).

4. Secuencia LBLOCA

Este accidente severo tiene como suceso iniciador un LOCA grande en la rama caliente y falla el sistema de refrigeración de emergencia del núcleo, salvo los acumuladores. El sistema de extracción de calor de la contención funciona durante toda la secuencia.

La presencia de 22 PAR distribuidos tal y como se señala en la tabla 2 consigue que no se superen los límites de inflama-

Tabla 9. Cantidades de H_2 y CO eliminadas por los PARs en la secuencia LBLOCA

Nº de PAR	H_2 generado (kg)	H_2 extraído por PAR (kg)	porcentaje	CO generado (kg)	CO extraído por PAR (kg)	porcentaje
22	2.097	1.355	65%	15.327	6.743	44%

bilidad en ningún nodo, excepto en el caso del compartimento anular, en el que se sobrepasan los límites de inflamabilidad desde el momento del fallo de la vasija (2,4 horas) hasta las 7,2 h, que es cuando la fracción molar de O_2 está por debajo del 5 %.

La cantidad de gases combustibles eliminados por los PAR se recoge en la tabla 9.

Los estudios de sensibilidad que se realizaron para la secuencia LBLOCA se describen en las siguientes subsecciones.

4.1 Aumento del número de PAR a 24 y 26

Los nuevos PAR se han colocado en el compartimento superior, el de mayor volumen libre (ver tabla 2). Los cálculos muestran que sólo son capaces de reducir el tiempo en el que se exceden los límites de inflamabilidad en el compartimento anular: se pasa de las 4 horas en el caso base a 1 hora en este caso.

4.2 Desactivación del sistema de rociado de la contención.

Los resultados indican que se superan los límites de inflamabilidad en la cavidad y en la cámara, pero no así en el resto de los nodos de la contención, porque, aunque la fracción molar de los gases combustibles (X_{H2}+X_{CO}) es significativamente mayor que en el caso base, los nodos están inertizados por insuficiente cantidad de oxígeno.

Conclusiones

En este artículo se ha analizado la eficacia de los PAR para evitar las combustiones incontroladas de los gases combustibles (H_2 y CO) generados en un accidente severo. La central modelada ha sido un PWR-W genérico de tres lazos con contención seca. Los cálculos los ha realizado el Ciemat para el CSN usando el código MELCOR desarrollado por la USNRC para el análisis de la progresión de un accidente severo y que es el habitualmente empleado por el CSN para sus evaluaciones independientes de seguridad en el campo de los accidentes severos.

Las principales conclusiones de estos cálculos son las siguientes

Los PAR se han mostrado muy eficaces para evitar la combustión de gases combustibles siempre que la distribución de gases en la contención sea suficientemente homogénea.

La activación del sistema de extracción de calor de la contención debe ser cuidadosamente analizada, porque al eliminar vapor de la atmósfera de contención vía condensación, puede originar el quemado no controlado de los gases combustibles y producir significativos aumentos de presión en el recinto.

Los cálculos muestran que el consumo de O_2 por los PAR puede originar la inertización del recinto de contención durante una parte de la fase ex-vessel del accidente severo.

Los resultados obtenidos son dependientes de ciertos modelos de planta: la nodalización de la contención y la composición del hormigón, destacan entre ellos.

Referencias

1. Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe, Santiago Aleza Enciso "Recombinadores autocatalíticos pasivos para la eliminación de gases combustibles en accidentes severos". ALFA Revista de seguridad nuclear y protección radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear. Número 37/2018
2. Humphries, L.L., Cole, R.K., Louie, D.L., Figueroa, V.G., Young, M.F., 2015ª. MELCOR Computer Code Manuals Vol. 1: Primer and Users' Guide (No. SAND2015- 6691 R)
3. Humphries, L.L., Cole, R.K., Louie, D.L., Figueroa, V.G., Young, M.F., 2015b. MELCOR Computer Code Manuals Vol. 2: Reference Manual (No. SAND2015- 6692 R)
4. Joan Fontanet, Luis E. Herranz "CSN-ACAS project: Impact of Passive Autocatalytic Recombiners and Filtered Containment Venting System on Postulated Ascó NPP Severe Accidents". Ciemat, DFN/SN-02/OP-18
5. M. Sánchez et al. "On the role of simulation codes in regulatory activities. Challenges and R&D needs". Nuclear Engineering and Design 409 (2023) 112345
6. Ross, K., Phillips, J., Gauntt, R.O., Wagner, K.C., 2014. MELCOR Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project (No. NUREG/CR7008). Sandia National Laboratories
7. Gastón Eduardo Pintos et al. Analysis of Containment Heat Removal Strategies during an Station Black Out Accident Using MELCOR" CSN. Abril, 2018

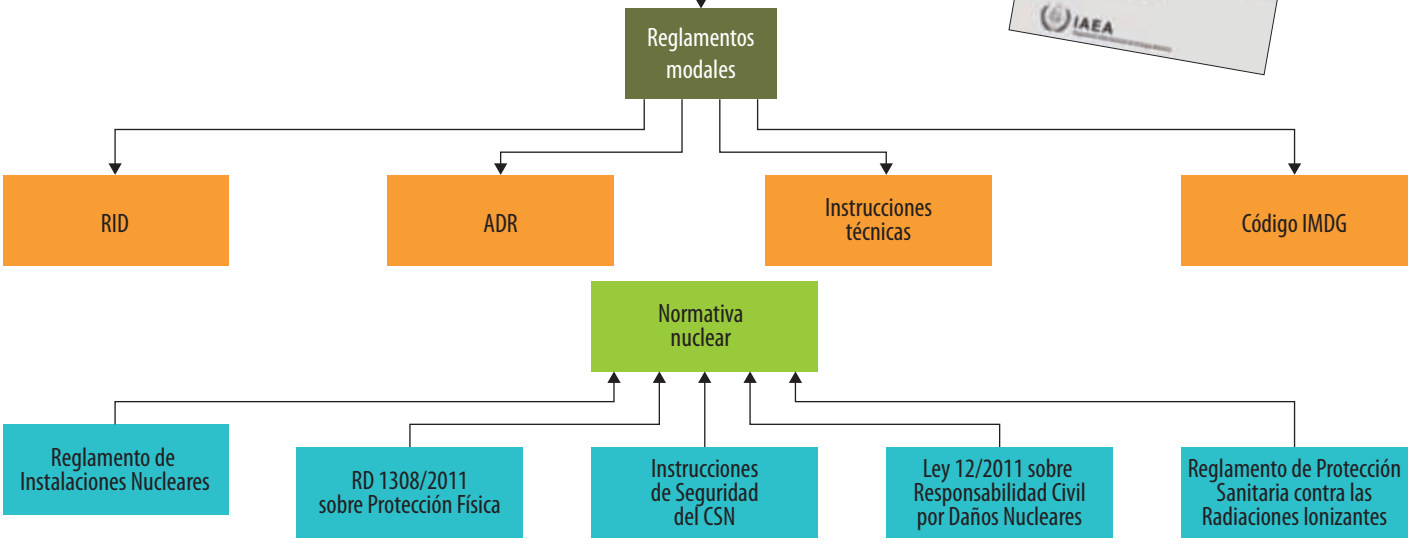
Procesos de transporte de material radiactivo

La seguridad en el transporte de material radiactivo se basa en una normativa internacionalmente aceptada, un sistema de aprobaciones claramente definido y una supervisión y control, donde la inspección es la actividad más importante.

■ Texto: **Manuel García Leiva |** Área de Transporte de Material Radiactivo del CSN. ■

Normativa

- El transporte de material radiactivo está regulado como mercancía peligrosa en España por una serie de reglamentos de aplicación internacional (reglamentos modales), que recogen los requisitos del Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos del OIEA (SSR-6).
- Además ha de cumplirse con la normativa nuclear: Ley de Energía Nuclear, Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas, Reglamento para la Protección Sanitaria frente a las Radiaciones Ionizantes, RD 1308/2011 sobre Protección Física, Ley 12/2011 sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares, Instrucciones del CSN
- La pirámide normativa se complementa con guías de aplicación específicas de Transporte (guías del CSN). Se destaca la GS nº 6.5. que ayuda a la aplicación de los requisitos reglamentarios.



Evaluación

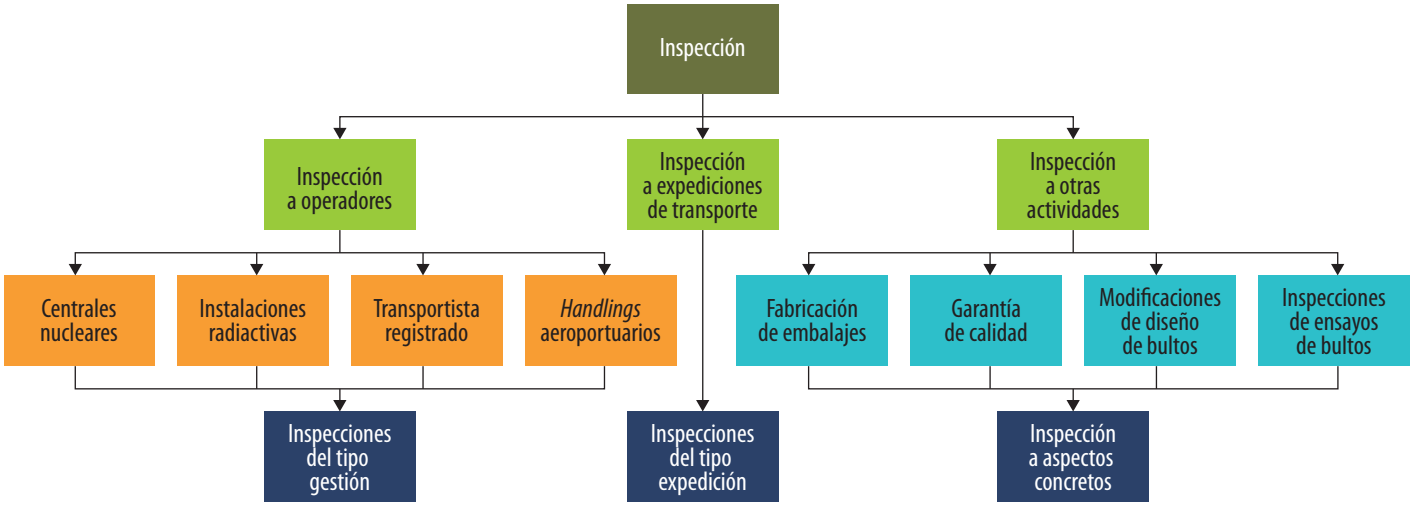
- La aprobación de los diseños de bulto y de las expediciones de transporte se emiten por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- El CSN lleva a cabo una evaluación técnica sobre la documentación presentada junto con la solicitud.
- El CSN ha publicado la *Guía de seguridad 6.4,* para facilitar la elaboración de la documentación de apoyo de las citadas autorizaciones

Tipo de bulto	Aprobación de bulto	Aprobación de expedición	Notificación previa
Exceptuado	No	No	No
Bulto Industrial	No	No	No
Tipo A	No	No	No
Tipo B(U)	Sí (unilateral) Si lleva MBD (1) , multilateral	No	Si la A > valor prefijado (4)
Tipo B(M)	Sí (multilateral)	Si la A > valor prefijado (4)	Sí
Tipo C	Sí (unilateral)	No	Si la A > valor prefijado (4)
Fisionable	Sí (multilateral)	Si ∑ ISC > 50 (2)	Según tipo de bulto (5)
Hexafluoruro de uranio (3)	Sí (unilateral)	No	Según tipo de bulto (3)

(1) MBD: material calificado como de baja dispersión. Su diseño está sujeto a aprobación multilateral.
(2) Si Índice de Seguridad con respecto a la criticidad (ISC) es mayor de 50 en un único contenedor o en un único vehículo.
(3) Si debido al enriquecimiento del uranio se tratara de material fisionable, deberían también cumplirse los requisitos de ese tipo de bultos.
(4) Si la Actividad > 3.000 A1 o 3.000 A2, según corresponda, o a 1.000 TBq, rigiendo entre estos valores el que sea menor.
(5) Los bultos fisionables estarán además clasificados como bultos industriales, bultos de Tipo A, B(U), B(M), por tanto pueden requerir la aprobación de la expedición según esos apartados.

Supervisión y control

- La Inspección es la herramienta mas importante de supervisión y control del CSN. Su objeto es comprobar el cumplimiento de los requisitos específicos de seguridad y protección radiológica.
- En relación con el transporte, se realizan tres tipos de inspección:
  - A la gestión global de la actividad de transporte
  - A expediciones de transporte
  - A otras actividades relacionadas con el transporte
- La frecuencia de las inspecciones se fundamenta en el riesgo en la experiencia operativa
- La actividad de inspección se lleva a cabo por el CSN o por las comunidades autónomas con acuerdo de encomienda.
- Anualmente se lleva a cabo un análisis de las desviaciones detectadas durante las Inspecciones
- La supervisión y control del CSN se complementa con el seguimiento de los sucesos ocurridos durante el transporte y por el análisis de la documentación remitida periódicamente por los expedidores, transportistas, fabricantes de embalajes u otros operadores, de acuerdo con los requisitos reglamentarios o en cumplimiento del condicionado de las aprobaciones preceptivas.
- Otros aspectos que ayudan a la adecuada supervisión y control están relacionados con el análisis de la experiencia operativa internacional, compartida por otros organismos reguladores en los foros internacionales en los que participa el CSN, tanto a nivel europeo (EACA) como internacional (OIEA, FORO Iberoamericano).



Carlos Hidalgo Vera (Madrid, 1956) es, desde 2021, subdirector general del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y director del Laboratorio Nacional de Fusión (LNF), que opera el reactor experimental TJ-II. En 1984 se doctoró en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Especializado en la investigación sobre la fusión nuclear como futura fuente de energía masiva y respetuosa con el medio ambiente, se incorporó al Ciemat en 1986 como investigador del comportamiento de plasmas de alta temperatura y en 2004 fue nombrado responsable de la División de Física Experimental del LNF. Ha realizado estancias de investigación en Finlandia, Francia, Dinamarca, Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Japón y China. Es presidente del Grupo sobre Ciencia y Sociedad de las Sociedad Europea de Física y del Grupo de Fusión Nuclear del Comité Científico y Técnico de Euratom. También ha ocupado otros cargos en diferentes instituciones nacionales y europeas. En 2023 ha formado parte de un grupo de trabajo de 12 expertos que ha realizado una propuesta a la Comisión Europea para acelerar el desarrollo de la fusión.

Carlos Hidalgo Vera, director del Laboratorio Nacional de Fusión

"En fusión nuclear, España es un ejemplo de éxito científico y tecnológico"

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■ Fotos: **Fernando Torrecilla** ■

PREGUNTA: *Da la impresión de que el desarrollo de la fusión nuclear va muy lento.*

RESPUESTA: Yo creo que el año 2022 ha sido muy importante por varios sucesos. Por un lado, de carácter científico: los resultados obtenidos en el reactor europeo JET, que consiguió un nuevo récord de energía de fusión con la estrategia magnética, y los del laboratorio NIF, en Estados Unidos, con la obtención de ganancia de energía de fusión nuclear con la estrategia inercial. Estos resultados han hecho realidad un sueño histórico: demostrar que somos capaces de generar de manera controlada energía de fusión. El segundo evento es la invasión de Ucrania, que ilustra el tremendo riesgo que para Europa supone su dependencia energética y la necesidad de apoyar fuentes de energía basadas en un aspecto en el que Europa es muy fuerte, que es el conocimiento, como la energía de fusión.

P: *No parece que esos acontecimientos hayan acelerado su desarrollo.*

R: Esos acontecimientos han puesto de manifiesto un problema, que la fi-

nanciación de la investigación en fusión es, casi al 100 %, pública. Solamente los estados invertían en su desarrollo. Y 2022 es también un punto de inflexión, porque para hacer realidad la segunda parte del sueño, llevar la fusión nuclear a la sociedad, las empresas han visto que corren el riesgo de quedarse fuera de esta gran revolución. El cambio de modelo de financiación de fondos públicos a fondos públicos y privados hace que haya una percepción a escala internacional de que hay que acelerar el impulso de la energía de fusión.

P: *Pero el problema energético actual no puede esperar a la fusión. Las renovables están disponibles y ya son competitivas.*

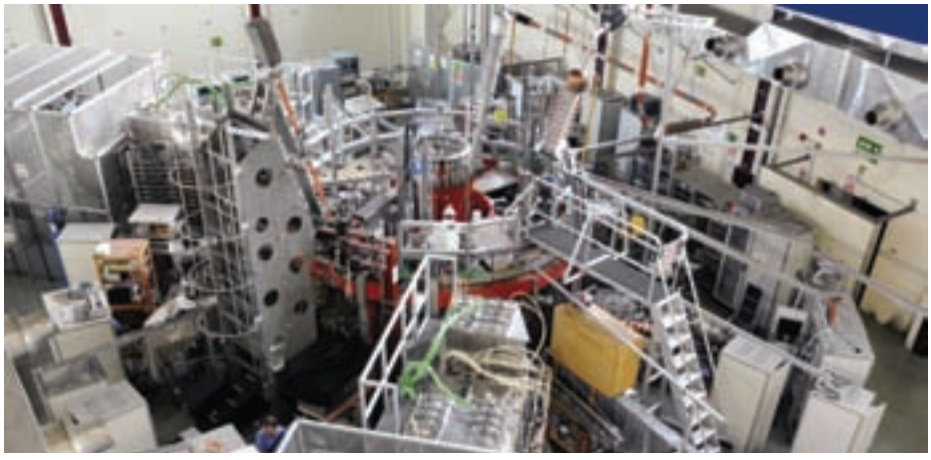
R: Lo que dices es muy pertinente, pero yo pienso que estamos en una encrucijada energética, donde todas las fuentes de energía van a ser necesarias para transitar del modelo actual hacia energía ambientalmente sostenible. Las renovables tienen un nivel de emisión de CO_2 muy bajo, pero son diluidas y fuertemente intermitentes.

P: *Eso tiene arreglo: almacenar.*

R: Para eso necesitas tener sistemas de almacenamiento masivo y hoy en día los sistemas de almacenamiento masivo no están en nuestras manos.

P: *¿Y no es más fácil, barato y rápido desarrollar sistemas de almacenamiento masivo que conseguir la fusión nuclear controlada?*

R: Puede ser, y esa es una línea de investigación prioritaria a escala planetaria. Lo que digo es que no debemos prescindir de ninguna fuente porque todas tienen pros y contras. La fisión nuclear tiene muy bajos niveles de emisión de CO_2 y es una energía desarrollada y muy eficiente, pero tiene una desventaja y es la aceptación social. Y en países democráticos la sociedad decide. Luego hay opciones masivas y sostenibles, y ahí está la fusión, que es cien veces más eficiente que la fisión, pero tiene un inconveniente y es que no está aún operativa. Yo creo que tenemos una encrucijada energética de tal magnitud que todas las opciones son necesarias.



Vista del reactor TJ-II.

P: *Las renovables se quejan de que el dinero dedicado a investigación en gran parte se ha ido a la fusión y no tanto a otras alternativas. ¿No se come ITER demasiados fondos?*

R: Pues yo creo que no. Pero, claro, esto es opinable. Creo que es un debate estéril decir 'hay que evitar el desarrollo de la fuente A y tenemos que centrarnos en la fuente B'. Y después de los acontecimientos de 2022, Europa ha tomado la decisión de promover acciones para acelerar la fusión nuclear.

P: *¿Qué acciones concretas son esas?*

R: Pues la acción principal es que la Comisión Europea solicitó a principios de 2023 a Eurofusión un análisis de cómo acelerar el desarrollo de la energía de fusión nuclear. Así, en enero de este año se formó un grupo de 12 personas de diferentes centros europeos, donde tengo el honor de participar, para determinar qué debemos hacer para hacer realidad la segunda parte del sueño, llevar la energía de fusión a la sociedad. A finales de julio hemos presentado a la Comisión Europea un informe con las conclusiones.

P: *¿A qué conclusiones han llegado?*

R: En esencia la idea tiene dos pilares. Uno de ellos es muy simple: hasta ahora el desarrollo de la fusión ha seguido una estrategia secuencial, que es la más conservadora. Vamos al objetivo A y una vez que lo obtenemos vamos al B y luego al C. Es una estrategia más segura, pero más lenta. Así que proponemos paralelizar. Eso significa que vamos al mismo tiempo a afrontar los cuatro grandes desafíos tecnológicos y científicos pendientes.

P: *¿Cuáles son?*

R: Uno es demostrar que los materiales de un reactor pueden soportar un tiempo suficientemente largo un entorno hostil, sobre todo por el efecto de los neutrones energéticos. El segundo desafío es que un reactor tiene que ser autosuficiente. El combustible que utiliza es deuterio, que es fácil de conseguir, y tritio, que inicialmente procede de reactores de fisión, pero posteriormente debe generarse en el propio reactor.

P: *Debe ser un ciclo cerrado.*

R: Sí, pero eso hay que demostrarlo y hay que demostrarlo con un factor de ganancia de generación de tritio mayor que uno. Ese es el segundo gran desafío tecnológico. El tercero es que, aunque desarrolles una configuración magnética muy eficiente, que permita mantener la materia con temperaturas unas diez veces la del centro del Sol y con unos campos magnéticos 100 000 veces el campo magnético terrestre, siempre habrá unos flujos de energía que llegan a las paredes del rector y que en ITER serán de unos diez Mw/m^2. Es esencial desarrollar materiales que soporten esas densidades de potencia de forma continua. Esos son los tres grandes desafíos tecnológicos. El cuarto desafío es decidir la configuración magnética de una planta de fusión comercial, entre tokamak y stellarator.

P: *¿Qué se propone para atajar estos cuatro retos?*

R: Lo que proponemos es paralelizar, que supone asumir ciertos riesgos con respecto al esquema secuencial. Pero significa también avanzar mucho más rápido.

P: *Hablaba de otro pilar de la propuesta…*

R: Sí. El segundo pilar de la recomendación de este informe es que esa paralelización requiere una cooperación público-privada. Si queremos acelerar, no bastarán los fondos públicos. Y esto significa un cambio de organización que no es menor. Esas son las cuestiones cla-

ve, pero el documento también entra en otras cuestiones técnicas más concretas.

P: *¿Por ejemplo?*

R: Pues detalles que no son banales, como que esa aceleración incluye adaptar el marco regulatorio de la fusión, que actualmente está marcado por la normativa de las centrales de fisión nuclear. Creo que el nivel de riesgo de un reactor de fisión nuclear es al menos…, digamos distinto al de un reactor de fusión nuclear. Por eso se plantea flexibilizar el marco regulatorio actualmente vigente, algo que también puede contribuir a esta aceleración de retos tecnológicos.

P: *¿Qué esperan que ocurra ahora desde el punto de vista político y financiero?*

> *"Acelerar el desarrollo de la fusión nuclear requiere flexibilizar el marco regulatorio actualmente vigente"*

R: El proceso ahora está en manos de la Comisión Europea.

P: *¿Cómo entra ITER en esta historia?*

R: Esta paralelización no significa para nada que se ignore ITER, que sigue siendo un punto de referencia del programa europeo e internacional. Lo que ocurre es que estas acciones se realizarían en paralelo. ITER sigue suministrando, ya no de manera secuencial, sino paralela, su experiencia en el diseño y construcción de componentes y también la experiencia operativa, que se transferirá al desarrollo de prototipos de reactores que viertan a la red, si finalmente es aceptada nuestra recomendación.

P: *¿Serán ya reactores comerciales?*

R: Las grandes revoluciones tecnológica suelen tener dos escalas, la de los prototipos y la de los modelos optimizados. Tendremos un prototipo con unos componentes básicos, que contemple los desafíos que antes hablábamos y que vierta energía a la red.

P: *¿Lo seguimos llamando DEMO?*

R: Sí. Para evitar confusión, le llamamos DEMO. Y este prototipo, así lo escribimos en el texto, va a ser un tokamak. ¿Por qué? Porque es la opción más

desarrollada. Y en paralelo, hay que ir al concepto de planta de fusión comercial.

P: *¿Y ese será un stellarator?*

R: Efectivamente, stellarator es un concepto que ofrece unas características singulares. Así figura en el texto que hemos escrito, con el que todo el mundo ha quedado satisfecho. Puede verse en el documento, que es público.

P: *Entonces, ¿para qué hacer un DEMO tokamak?*

R: Porque es el prototipo, que no es necesariamente la opción de un sistema comercial. Yo no tengo ninguna duda de que una planta de fusión comercial será un stellarator.

P: *España tiene un stellarator, así que es normal que defiende esa opción. ¿Qué defendían otros países?*

R: De esas 12 personas, la única persona que representaba a un laboratorio de stellarator era yo. Por eso debo decir que la redacción final me agrada, porque significa que las 12 personas de este comité hemos hecho un ejercicio con argumentos puramente científicos, tecnológicos. Hubo consenso y así queda reflejado en la redacción del documento.

P: *¿Cada una de las personas del comité era de un país distinto? ¿Y cuántas mujeres había?*

R: No estaba equilibrado porque solo había dos mujeres. En Europa hay un 30 % de mujeres en el ámbito de la fusión y en este comité ni siquiera llegamos a ese porcentaje. En principio, se nos pidió estar en ese comité sin representar a ningún país y había países que no estaban y otros que tenían más de un miembro.

P: *La historia de ITER no muestra precisamente un avance rápido. Ha habido retrasos de casi dos décadas y el presupuesto ha pasado de 5 000 a más de 20 000 millones de euros.*

R: Ha habido dos problemas técnicos. Uno de ellos por problemas de corrosión en los tubos de refrigeración del escudo térmico; y otro por problemas en el ensamblaje de la cámara toroidal, por desajustes en algunas piezas que han dificultado la soldadura de unos módulos con otros.

P: *¿Ese problema se debe a que cada pieza la construye un país?*

R: Claro. ITER surge como un proyecto político, muy sólido en este aspecto, pero desde el punto de vista operativo no creo que sea un ejemplo de eficiencia. Repartir componentes ha dificultado los procesos de control de calidad. Si lo hubiera ejecutado un solo país se habrían ensamblado las piezas perfectamente. Dice Petro Barabaschi, el nuevo director, que han surgido problemas, pero que lo importante es que se han detectado y están en fase de reparación. En el escudo térmico se ha utilizado un acero que no era el óptimo y en el desajuste del ensamblaje se está estudiando rebajar lo que sobra y rellenar lo que falta con soldadura.

P: *¿No parece eso una chapuza más que una solución?*

R: Yo creo que no. Yo creo que es un desajuste consecuencia de una organización muy compleja. Y creo que es una lección a aprender. Por eso DEMO va a ser completamente Unión Europea; todos los componentes se van a ejecutar aquí. Y esa es una lección que hemos aprendido de ITER.

P: *De todas formas, las demoras empezaron mucho antes, hace más de 20 años.*

R: Yo diría que fueron las demoras esperables ante un proyecto de esta complejidad, porque nunca se han construido imanes superconductores tan grandes como los de ITER, por ejemplo; con tantos actores y con controles de calidad que no han sido eficientes.

P: *¿Todos los países implicados colaboran adecuadamente?*

R: Ahí hay un tema importante, que es el conocimiento. En ITER la información es compartida y evidentemente todos los actores se quieren beneficiar de ese conocimiento. Europa ocupa una posición de liderazgo científico y tecnológico y se arriesga a que en los próximos años pueda quedar relegada a una segunda posición si no se mueve con aceleración y promueve un cambio de modelo al de financiación público-privada. Porque acelerar significa más recursos económicos. Algo que ya están haciendo Estados Unidos y también China y Corea. Cómo ges-

tionar la propiedad intelectual es un desafío no menor.

P: *¿Qué empresas pueden sentirse llamadas a participar?*

R: Probablemente grandes corporaciones con interés en el mundo de la energía. Y el cómo se va a articular esta transición es uno de los grandes desafíos. Ha habido recientemente consultas por parte de la Comisión Europea a diferentes laboratorios para conocer su experiencia en la colaboración público-privada. El programa español y el del Ciemat tiene como un objetivo a corto y medio plazo involucrar a toda la red del sistema de I+D+i, el mundo académico y la industria. Creo que puedo decir que en fusión nuclear España es un ejemplo paradigmático de éxito científico y tecnológico. El grado de retornos industriales que tiene la fusión nuclear es algo desconocido en la historia española en ciencia y tecnología. Actualmente, España ocupa el segundo lugar en retornos industriales por contratos de ITER.

P: *¿Para la construcción?*

R: Por la construcción y también por grandes contratos en componentes de alta tecnología. En grandes imanes, instrumentación sofisticada, desarrollo, diseño de sistemas de diagnóstico, sistemas de toma de datos, etcétera. Este es un primer aspecto del que nos podemos sentir muy orgullosos. Además, la Agencia Europea de ITER está en Barcelona, con 400 científicos, ingenieros, personal administrativo... Y con IFMIF-DONES, una instalación que se ha gestado aquí, en Ciemat, y que aborda ese gran reto de materiales.

P: *¿España está en primera línea en fusión nuclear?*

R: Sí, y yo creo que por dos factores. Uno, la semilla que supuso poner en operación el TJ-II hace 25 años, que se construyó, como estaba previsto, en siete años y con un presupuesto de 30 millones de euros. Fue una apuesta con gran visión de futuro, porque optaba por stellarator y 25 años después este grupo de 12 expertos reconoce que las plantas comerciales serán stellarators. Ahora, los retornos industriales, los contratos ganados por empresas españolas en ITER superan los mil millones de euros. Y el segundo, que España tiene una industria nuclear de fisión muy consolidada.

P: *¿España podría optar a albergar DEMO o el reactor comercial?*

R: En el documento que hemos elaborado decimos que es fundamental que Europa decida lo antes posible la ubicación de DEMO. Y este es algo que hemos pensado en Ciemat y lo hemos hablado con el Consejo de Seguridad Nuclear: España tiene una oportunidad muy clara. Además de lo que ya hemos dicho, es un país con instalaciones de fisión en fase de desmantelamiento y otras que nunca llegaron a operar, como Valdecaballeros. Y estos emplazamientos son ideales para ubicar DEMO. España debe pensar muy seriamente el lanzamiento de una candidatura.

> *"España tiene una oportunidad muy clara y debería lanzar una candidatura para albergar el reactor DEMO"*

P: *Y está la experiencia en stellarator.*

R: TJ-II nos ha permitido obtener resultados clave en los últimos años. Junto con el Wendelstein 7-X, de Alemania, hemos demostrado que las bobinas magnéticas necesarias para un stellarator, que son más complicadas que las de un tokamak, se pueden construir con la precisión necesaria. Y esa configuración magnética optimizada será la base de un proyecto de diseño avanzado de stellarator impulsado por España. También ha servido para entender el comportamiento de la materia en condiciones extremas. Y la medición de campos eléctricos, para lo que decidimos, hace ya 20 años, construir el sistema más sofisticado, junto con el Instituto Kurchatov de Moscú y el Instituto Tecnológico de Jarkov, en Ucrania. Es algo único, que nos posiciona en la frontera del conocimiento. Lo que podemos medir aquí no lo puede medir nadie más. Y también hemos demostrado la autoorganización zonal que se produce en el plasma. Tras la invasión de Ucrania conseguimos que los dos científicos de Jarkov con los que trabajábamos y sus familias pudieran venir aquí. Actualmente colaboran con el Ciemat.

P: *¿Cuándo podremos empezar a tener resultados?*

R: En la propuesta que hemos hecho lo que se contempla es que DEMO podría estar vertiendo energía a la red en 2045. En ese escrito hablamos de cuatro fases: diseño conceptual, diseño de ingeniería, habilitación de las instalaciones para la construcción y la puesta en la operación.

P: *¿Y el stellarator comercial?*

R: En 2050 quizás. Ya estamos trabajando en paralelo, diseñando las vasijas magnéticas que necesitamos y diseñando prototipos de bobinas optimizadas para el reactor y, en paralelo, esos retos tecnológicos que son independientes de un tokamak o un stellarator. Demostrar que el acero de una vasija soporta la presencia de neutrones de 14 megaelectronvoltios.

P: *Eso es IFMIF-DONES. ¿Cuándo estará funcionando?*

R: Se estima que el tiempo de construcción serán 11 años, así que debería empezar a operar el año 2034. Y en paralelo, Europa y este laboratorio en particular tiene un esfuerzo intensísimo en validar toda la tecnología de tritio.

La electrificación plena del mercado automovilístico pasa por mejorar radicalmente la capacidad actual de los acumuladores

La revolución de las baterías

El vehículo eléctrico emerge como la principal alternativa a los de combustión ante el reto de la descarbonización. En 2022, en Europa se vendieron 11,31 millones de automóviles, de los cuales 2,59 millones (el 23 %) eran eléctricos puros o híbridos enchufables. Cifras que crecen año tras año de forma vertiginosa. En 2019 se vendieron 0,56 millones, en 2020 1,35 y 2,25 en 2021. Pero mantener el ritmo de crecimiento hasta conseguir la plena electrificación del mercado automovilístico, como pretende la Unión Europea, tiene un factor limitante: las prestaciones de las baterías actuales distan mucho de cumplir con las expectativas de los usuarios. Fabricantes y centros tecnológicos de todo el mundo han emprendido una intensa carrera por conseguir nuevos modelos de baterías que revolucionen su capacidad. Ya se plantea la llegada inminente de vehículos con más de mil kilómetros de autonomía y que se recarguen en menos de 15 minutos.

■ Texto: **Juan Quinto** | periodista de ciencia ■

Entre 1970 y 1985 el físico John B. Goodenough y los químicos Michael Whittingham y Akira Yoshino, desarrollaron las primeras baterías de iones de litio, un logro cuyas consecuencias eran por entonces difíciles de pronosticar. Su invento, reconocido en 2019 con el premio Nobel de Química, mejoró notablemente la portabilidad de los aparatos electrónicos que hoy usamos cotidianamente desde que, en 1991, Sony lo incorporó a sus productos. Sin las baterías de ion litio las prestaciones de móviles, tabletas, reproductores de música, portátiles y otros artilugios semejantes serían

ridículas y no permitirían el uso que actualmente les damos.

En el último cuarto de siglo, la necesidad de acometer la descarbonización de la economía, por el impacto del uso de combustibles fósiles en el cambio climático, ha incrementado exponencialmente la demanda de estos acumuladores de energía. El vehículo eléctrico se ha convertido en el emblema de esta transformación y sus ventas crecen cada año. En el primer semestre de 2023 el automóvil más vendido en Europa ha sido, por primera vez, uno eléctrico, el Tesla Y, con más de 125 000 unidades, lo que supone un incremento del 211,7 % sobre el mismo periodo de 2022. Y según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la demanda de baterías de ion-litio para automoción en todo el mundo pasó de 330 GWh en 2021 a 550 en 2022.

Pero será complicado seguir incrementando de forma notable estas cifras si no se solucionan los principales problemas que plantea esta tecnología: la autonomía de estos vehículos, ya que ninguno de los disponibles comercialmente alcanza los 600 kilómetros reales; y el tiempo de recarga, aunque varía en función del tipo de batería, de las características del punto de recarga y de otras variables, como el tiempo atmosférico, difícilmente se realiza en menos de un par de horas, salvo que se disponga de un punto de recarga ultrarrápido y que el vehículo permita su uso. El objetivo de una completa electrificación del transporte a medio plazo parece complicado si no se resuelve este problema, acrecentado por la necesidad de crear multitud de electrolineras para el abastecimiento.

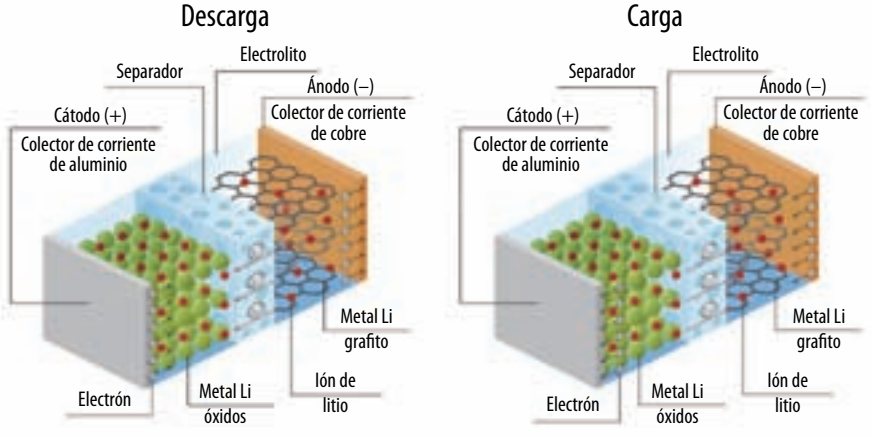
Además, hay otros aspectos problemáticos a tener en cuenta a la hora de mejorar el rendimiento de una batería, como el número de ciclos de recarga que soporta (actualmente de media unos 2 000), la potencia, el tamaño, el peso, los materiales empleados (su abundancia, accesibilidad, distribución geográfica, facilidad de procesado), su seguridad (el litio es altamente inflamable y ligeramente explosivo), su coste y su impacto ambiental. Por ejemplo, según la AIE, el fuerte incremento de las ventas ha hecho que en 2022 el 60 % de la demanda de litio, el 30 % de la de cobalto y el 10 % de la de níquel se destinara a baterías para vehículos eléctricos, cuando cinco años antes esos porcentajes eran, respectivamente, 15, 10 y 2 %

Roberto Pacios.

En todos estos aspectos se busca mejorar, pero, como dice Roberto Pacios, del centro tecnológico vasco CIC energiGUNE, especializado en este ámbito, "para cualquier aplicación que requiera el uso de una batería es conveniente cumplir de forma suficiente todos esos indicadores, pero es prácticamente imposible cumplirlos todos muy bien a la vez". Según la aplicación de que se trate puede interesar más mejorar uno u otro aspecto, aunque el más importante es la densidad energética; es decir, la cantidad de energía capaz de acumularse en función del volumen o el peso de la batería. En los automóviles eléctricos se trata de conseguir que en poco espacio dispongamos de carga suficiente para realizar un largo recorrido.

Las cifras mejoran de forma constante porque se van incorporando nuevos materiales. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos, la densidad energética de las baterías usadas en automoción se ha multiplicado por ocho entre 2008 y 2020. La densidad energética máxima de las utilizadas actualmente en automóviles es de unos 250 Wh/kg, aunque se producen

Esquema de funcionamiento de la batería de iones de litio



Presentación de la batería condensada para aviones desarrollada por la empresa china CATL.

Del patinete al avión

No solo los automóviles se están electrificando. Las baterías de ion-litio equipan ya otros medios de transporte como patinetes y bicicletas. También grandes vehículos como camiones y autobuses eléctricos circulan ya por las carreteras. Y el referente en el transporte eléctrico, Tesla, lanzó en diciembre de 2022 su camión Tesla Semi, con una autonomía de 804 kilómetros, convertido ya en referente del sector.

Sobre el agua también se está produciendo una lenta electrificación. Ya hay fabricantes que han desarrollado baterías específicas para barcos, como la francesa Saft, del grupo TotalEnergies, que ha lanzado la Seanergy 2.0 especialmente diseñada para embarcaciones con motor eléctrico o híbrido.

El mayor fabricante mundial de baterías, la empresa china CATL, ha desarrollado una batería de grandes prestaciones que ha denominado batería condensada, presentada en abril pasado y que, aseguran, multiplica por dos la densidad energética hasta alcanzar los 500 Wh/kg y que permitiría incluso utilizarse para aviones eléctricos. El fabricante no ha desvelado los detalles de su tecnología, tan solo que el electrolito está hecho de materiales biomiméticos de alta conductividad que forman una microestructura, y también utiliza innovadores materiales para los electrodos, aunque no aporta información más precisa. Aseguran que ya están trabajando con otros socios en el desarrollo de un avión de pasajeros eléctrico, equipado con sus baterías condensadas.

Más allá del transporte, las baterías empiezan también a colonizar las viviendas como acumuladores de electricidad si disponen de paneles fotovoltaicos, para conseguir una independencia casi absoluta del suministro eléctrico. Entre los diferentes modelos disponibles, destaca el que ha lanzado Tesla, la batería Powerwall, que no solo permite aprovechar durante la noche la energía generada durante el día sino que salta automáticamente cuando se produce un corte del suministro de la red. Además, las nuevas baterías tienen un gran nicho de mercado adicional en esta misma línea, pero a gran escala: acumular la energía sobrante de las centrales de energía renovable. ◗

mejoras de forma continua. Todas los fabricantes de vehículos y muchísimos otros laboratorios de todo el mundo dedican un gran esfuerzo a la investigación en este campo y hay cientos de ideas compitiendo por conseguir la batería del futuro.

El interior de la celda

Las baterías de ion-litio de los automóviles están hechas con cientos o miles de pequeñas células conectadas en serie o en paralelo. Las hay de diferentes formatos, pero las más habituales son cilíndricas, semejantes a las pilas AA, aunque

Batería de iones de litio para automoción.

un poco mayores. Cada una de ellas dispone, básicamente, de tres elementos esenciales: el ánodo, el cátodo y, entre medias, el electrolito, en forma de tres finas láminas enrolladas. Tiene, además, otro elemento de seguridad llamado separador. Los iones de litio viajan del ánodo al cátodo cuando generan energía y realizan el trayecto contrario al recargarse, siempre a través del electrolito. Cada elemento juega un papel diferente y las investigaciones en marcha se dirigen a mejorar cada uno de estos tres elementos.

"Para el ánodo, el material más utilizado es el grafito. Ahora se está empezando a mezclar con silicio para aumentar la cantidad de energía que puede acumular. El siguiente paso será hacerlo de litio metal, pero tendrá que ser en combinación con electrolitos sólidos, porque no es compatible con el electrolito líquido actual", explica Pacios. Con esos dos cambios, ánodo de litio metal y electrolito sólido, se conseguiría, según este

investigador, llegar a los 1 000 kilómetros de autonomía.

El cátodo suele estar hecho de litio mezclado con óxidos metálicos, de hierro, níquel, manganeso, cobalto… "Los que mejor funcionan son los que tienen cobalto y, sobre todo, níquel. Los cátodos ricos en níquel y litio son los mejores en cuanto a la cantidad de energía que pueden almacenar -dice Pacios-. Pero tanto el cobalto como el níquel tienen problemas de suministro. El níquel es muy caro y el cobalto se extrae principalmente de minas africanas en condiciones poco éticas". Por eso, en el CIC energiGUNE, como en muchos otros laboratorios, se trabaja en materiales alternativos, como el manganeso.

El principal foco de atención de nuevas baterías se centra en el electrolito y hay un término que define el futuro: la batería de estado sólido, una meta que cada vez parece más cercana. Los electrolitos actuales están hechos de líquidos o geles, disolventes orgánicos, carbonatos, que pueden evaporarse y provocar un cortocircuito entre ánodo y cátodo, generando una explosión (de ahí la importancia del separador). Las de estado sólido eliminan este riesgo y además permiten una mayor acumulación de energía. Los materiales con los que se investiga para este objetivo son muy variados. "Principalmente hay tres tecnologías: por un lado, los polímeros y por otro los cerámicos, que pueden ser óxidos o sulfuros de diferentes metales", explica Pacios.

En CIC energiGUNE, considerado uno de los tres centros de investigación más relevantes de Europa en almacenamiento de energía, se investiga en todas estas líneas. "Tenemos departamentos que se centran en el ánodo, otros en el electrolito y otros en el cátodo. Y es vital estudiar los tres elementos de forma conjunta. Y trabajamos en todas las líneas de electrolito sólido, aunque nuestra principal fortaleza es el polimérico, donde llevamos muchos años trabajan-

Información contenida en el pasaporte europeo de baterías

Información técnica
- Composición del material.
- Capacidad nominal (en Ah).
- Capacidad de potencia original (en vatios) y límites.
- Vida útil prevista de la batería.
- Umbral de capacidad de agotamiento.
- Eficiencia energética inicial de ida y vuelta.
- Resistencia interna de la celda de la batería y del pack.
- C-rate e información sobre prevención y gestión de residuos de baterías.

Información sostenible
- Información sobre la huella de carbono.
- El contenido reciclado.
- La proporción de contenido renovable.

Información administrativa
- Información sobre abastecimiento responsable.
- Periodo durante el cual está vigente la garantía comercial.
- Los requisitos del marcado.
- La declaración de conformidad de la UE.

Fuente: CIC energyGUNE

Cuestión de sostenibilidad

Las baterías del futuro no solo deberían contribuir a reducir el impacto de los combustibles fósiles, también deberán ser sostenibles en sí mismas. Parte de las investigaciones en marcha contemplan el problema de la obtención de los materiales utilizados y su posible reciclado cuando terminen su vida útil. La Unión Europea ha aprobado en 2023 una nueva normativa que regula el impacto de las pilas y baterías a lo largo de todo su ciclo de vida y fomenta la aplicación de la economía circular en este sector. En esa línea, se contempla el reciclado de los componentes, lo que conlleva no solo una reducción de residuos sino también un incremento de materiales reciclados en la fabricación, reduciendo las materias primas, que provienen mayoritariamente de terceros países. A partir de 2027 deberá recuperarse al menos el 50 % del litio y el 90 % del cobalto, níquel y plomo y en 2031 esas cifras serán del 80 % del litio y el 95 % de los otros tres componentes. Y las nuevas baterías deberán contener materiales reciclados a partir de 2031 (al menos un 6% de litio, 16 % de cobalto, 6 % de níquel y 85 % de plomo), cifras que ascenderán en 2036 a 12 %, 26 %, 15 % y 85 % respectivamente). Un elemento central de la nueva regulación es el establecimiento de un pasaporte que contenga la información esencial de cada modelo de batería, lo que permitirá el seguimiento y localización de las baterías, conocer el origen de los materiales y evaluar su impacto ambiental. En el caso de las baterías de pequeños aparatos electrónicos, establece que a finales de 2027 deberán poder ser extraíbles por el usuario. ◗

Batería de litio de un coche eléctrico y conexiones de alimentación. Derecha, batería de niquel de Tesla y la Universidad Dalhousie, montada en un prototipo.

do y con la ayuda del padre del electrolito sólido, el francés Michel Armand", dice Pacios.

Este santo grial del sector, la batería de estado sólido, empieza a estar al alcance de la mano. La empresa francesa Blue Solutions ya fabrica alguna para autobuses, según Roberto Pacios. Numerosos prototipos se van dando a conocer y se calcula que para 2027 podría ya estar incorporándose a los vehículos, mejorando de forma crucial su densidad energética, lo que se traducirá en menor volumen y peso y mucha mayor autonomía, además de mejorar la seguridad y conseguir recargas completas en menos de 15 minutos. Fabricantes de todo el mundo están en ello y anuncian cada poco avances en ese desarrollo. Toyota asegura que dentro de cuatro años ya estará equipando sus vehículos con ellas. En España, la empresa Basquevolt, creada en 2022 y ubicada cerca de Vitoria, anunció en junio que este mismo año fabricará un prototipo de batería de litio de estado sólido, a partir de la tecnología desarrollada por CIC energiGUNE y pretende iniciar su comercialización también en 2027.

Un millón de millas

La duración de una batería de ion-litio de automóvil es de unos ocho años. Pasado ese plazo suelen haber perdido en torno a un 30 % de su capacidad de almacenamiento. Por eso, los fabricantes suelen garantizar las baterías por ese periodo. Luego conviene cambiarlas, pero las viejas pueden utilizarse para almacenar energía fotovoltaica en el hogar. En cualquier caso, otro de los retos de las nuevas baterías es prolongar su vida útil. Y aquí también se han conseguido avances espectaculares. Jeff Dahn, investigador de la Universidad Dalhousie, en Canadá, dirige desde 2016 numerosos proyectos para Tesla y, entre otras cosas, en 2022 consiguió la llamada "batería del millón de millas", capaz de soportar 10 000 ciclos de recarga, cinco veces más que las baterías actuales, lo que significa que podría superar el millón y medio de kilómetros recorridos sin pérdida significativa de su capacidad.

Otro de los problemas a solucionar es el de los materiales empleados. El litio tiene recursos limitados y, aunque se empiezan a descubrir y explotar nuevos yacimientos, su extracción plantea impactos medioambientales indeseables y un coste elevado. Por eso, se investigan alternativas y una de las más sólidas es la de iones de sodio. Hay diferentes empresas que están desarrollando esta idea, como Tiamat en Francia y Faradion en Reino Unido, que ya ha desarrollado un prototipo en fase de demostración. El grupo liderado por Donald Sadoway, del Massachusetts Institute of Technology, ha publicado en *Nature* la posibilidad de construir baterías con un electrodo de aluminio, otro de azufre y cloruro sódico como electrolito, materiales mucho más abundantes y baratos. Los modelos que han construido soportan cientos de ciclos de recarga, soportan temperaturas de hasta 200º C, se recargan con mucha rapidez y no pueden explotar ni arder. Pese a todo, la mayor parte de los expertos se muestra escéptico sobre la posibilidad de sustituir al litio a medio plazo.

La batería del futuro no será una, sino que habrá una gran variedad en función de la propiedades que se pretendan conseguir. Por ejemplo, las baterías actuales de los aparatos electrónicos portátiles cumplen bastante bien con la demanda, aunque se benefician también de los avances de estas investigaciones para conseguir mayor duración de uso y menor tiempo de recarga. En cada caso primarán unas prestaciones u otras: ligereza, seguridad, capacidad, duración… Como dice Roberto Pacios: "No le puedes pedir al campeón del mundo de maratón que también lo sea de los 100 metros lisos".

Cómo funciona la batería de iones de litio

Foto de familia de la 70ª sesión de UNSCEAR en Viena.

El comité de la ONU que estudia los efectos de la radiación ionizante

El Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, por su acrónimo en inglés) fue creado en 1955 por Naciones Unidas con la misión de dar respuesta a la preocupación de la comunidad internacional en relación con el posible impacto sobre la salud de la emisión a la atmósfera de contaminantes como consecuencia de las pruebas nucleares. Inicialmente se invitó a 15 estados pertenecientes a la ONU a nombrar a científicos participantes en el Comité. Actualmente forman parte de él 30 países, entre los cuales se encuentra España, y su tarea se centra en estudiar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

■ Texto: **Pura C. Roy** | periodista de ciencia ■

Las radiaciones ionizantes, tanto las de origen natural como las producidas por sus aplicaciones energéticas, médicas, industriales y de otros tipos, pueden tener efectos indeseables en los seres vivos, tanto a nivel molecular como celular y tisular, influyendo en la aparición de enfermedades, riesgos derivados para la salud y efectos sobre el medio ambiente. UNSCEAR tiene actualmente como su principal objetivo centralizar y analizar toda la información sobre este fenómeno que se genera en laboratorios y centros de investigación de todo el mundo,

La información de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes es revisada periódicamente con la información científica disponible. Esto permite confeccionar y hacer análisis exhaustivos, entre otras cosas, de las relaciones dosis-efecto que son la base para limitar las dosis y minimizar los riesgos. Su metodología es abarcar la gama más amplia de fuentes de radiación a las que pueden estar expuestas las personas. Estas evaluaciones contribuyen esencialmente al trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

El Comité celebra una sesión anual, que este año tuvo lugar del 19 al 23 de junio en Viena. Fue su 70ª sesión y en

ella participaron más de 150 expertos de 30 Estados miembros del Comité y 11 organizaciones internacionales. Entre los ámbitos de discusión de esta última sesión se incluían documentos técnicos sobre cuestiones como el segundo cáncer primario después de la radioterapia; estudio iniciado en 2019 con finalización prevista en 2024. Ya desde hace muchos años, la radioterapia ha sido identificada como una posible causa de cáncer.

Gran parte de lo que sabemos sobre los efectos de la radiación en la salud ha surgido del estudio de los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en 1945 sobre Japón. También se ha aprendido de los trabajadores que llevan a cabo ciertas labores que conllevan exposición a la radiación, así como de los pacientes tratados con radioterapia para el cáncer y otras enfermedades.

Otro de los temas analizados en Viena ha sido la exposición pública a la radiación ionizante, un trabajo iniciado en 2020 y que terminará previsiblemente también en 2024. La exposición a la radiación ionizante se debe tanto a fuentes artificiales como a fuentes naturales como la radiación procedente del espacio o del gas radón que emana de rocas de la Tierra.

Como parte de este trabajo en curso UNSCEAR está realizando actualmente una encuesta mundial en línea para recopilar datos sobre este tema, que ya ha sido respondida por 53 países. El presidente del Comité, el Dr. Jing Chen, destacó "la importancia de la cooperación y el apoyo de todos los Estados miembros en el suministro de datos y señaló que se necesitan que sean aportados especialmente por África, América Latina y Asia, para permitir una evaluación científica geográficamente equilibrada sobre los niveles y tendencias de exposición del público a las radiaciones ionizantes".

Para facilitar esta labor, en 2014 UNSCEAR lanzó una plataforma en línea, que es una base de datos electrónica para el envío de información. Esta plataforma tiene como objetivo consolidar los datos disponibles sobre exposición médica, ocupacional y pública.

Según los datos recopilados con anterioridad a 2014, se estimó que aproximadamente 24 millones de trabajadores estuvieron expuestos a fuentes naturales y artificiales de radiación ionizante en el período 2010-2014. Alrededor del 52 por ciento (12,6 millones) de ellos estaban empleados en sectores que involucran exposición a fuentes naturales de radiación (como mineros de carbón y tripulaciones aéreas) y alrededor del 48 por ciento (11,4 millones) trabajaban en sectores que involucran exposición a fuentes artificiales de radiación (como trabajadores de plantas de energía nuclear, radiógrafos industriales y personal médico). El número total de trabajadores ha aumentado ligeramente en comparación con el período 1995-1999, cuando se estimó que alrededor de 21,5 millones de trabajadores estaban expuestos a alguna de dichas fuentes. Por ello es de gran interés la actualización de todos los datos a nivel mundial.

Programa de trabajo 2020-2024

Junto con las líneas anteriormente citadas en la 70ª sesión de este organismo tuvieron lugar discusiones técnicas sobre los documentos previamente revisados y se analizó el avance de otros diferentes documentos. La siguiente fase será la elaboración de diferentes informes técnicos. Entre ellos se encuentran: estudios epidemiológicos de radiación y cáncer (iniciados en 2019 con finalización prevista en 2025); evaluación de enfermedades del sistema circulatorio por exposición a la radiación (iniciado en 2021 con finalización prevista en 2025); enfermedades del sistema nervioso (propuesto en 2022); y los que se lanzaran próximamente para su discusión, como opacidades de lentes oculares y efectos de la radiación en el sistema inmunológico.

El programa de trabajo del Comité es aprobado por la Asamblea General de Naciones Unidas y se extiende normalmente durante un período de 4 a 5 años. Por otro lado, la secretaría del Comité recopila datos relevantes presentados por los Estados miembros de la ONU, organizaciones internacionales y organizaciones no gubernamentales, y contrata a especialistas para analizar esos datos, estudiar la literatura científica relevante y producir las respectivas evaluaciones científicas.

Como resultado de todo este esfuerzo se publican informes específicos sobre temas concretos, basados en evidencias científicas, además de algunos informes periódicos, como los que se refieren a las fuentes, efectos y riesgos de las radia-

Paises miembros del Comité.

Los miembros de la misión española en la 70ª sesión de UNSCEAR en Viena.

ciones ionizantes que suelen contener los análisis de las exposiciones médicas, a los trabajadores y al público general y que constituyen una referencia a nivel mundial.

A lo largo de las décadas, el Comité se ha convertido en la autoridad mundial en la ciencia de la radiación y la estimación de los niveles globales y los efectos de la exposición a la radiación ionizante. Los gobiernos y las organizaciones de todo el mundo confían en sus estimaciones como base científica para evaluar el riesgo de radiación y establecer medidas de protección.

La organización de UNSCEAR destaca que es un comité de expertos que no desarrolla políticas ni presta asesoramiento a los gobiernos o a los organismos regionales o internacionales. Sin embargo, muchos gobiernos y órganos competentes optan por hacer uso de sus evaluaciones científicas para el desarrollo de políticas; por ejemplo, en lo que respecta a la protección de la salud, protección del público y el medio ambiente, preparación para situaciones de emergencia, remediación de las tierras contaminadas y, en general, aquellas decisiones relacionadas con el uso de la radiación ionizantes. Sí está entre sus mandatos presentar un informe anual a la Asamblea General de Naciones Unidas en el cual se reflejan las actividades y trabajos realizados a lo largo del año.

El Comité tampoco aborda los beneficios económicos o de otro tipo que pueda proporcionar el uso de tecnologías que emplean radiaciones, ni establece políticas, estándares o recomendaciones de protección, ya que estos están dentro del mandato de otros organismos internacionales.

Presencia española

En 2011 la Asamblea General de Naciones Unidas invitó a España a nombrar representantes para formar parte del Comité como miembro de pleno derecho. Con anterioridad España ya participaba en calidad de observador en las asambleas anuales, con expertos como David Cancio y Eliseo Vañó. De hecho, España ya aportó datos de exposiciones médicas en el año 1993 y el Ministerio de Sanidad creó un Grupo de trabajo UNSCEAR, con expertos de varias Comunidades Autónomas, que tuvo su primera reunión en junio de 1999, para colaborar en la preparación de los datos sobre exposiciones médicas.

Desde 2011 España ha participado activamente en todas las sesiones que han tenido lugar, asistiendo a las mismas como representación nacional personal del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), a petición del Ministerio de Exteriores. El CSN es el único organismo español con competencias en seguridad nuclear y protección radiológica y es el encargado de informar directamente al Congreso de los Diputados y al Senado, además de

Presentación de conclusiones por la presidencia de la 70ª sesión.

Programa de trabajo 2020-2024

El actual programa de trabajo de UNSCEAR se aprobó en el 67º periodo de sesiones (año 2020), abarca un periodo de 5 años e incluye, entre otros aspectos, la definición de las áreas científicas prioritarias. Entre ellas se encuentran las fuentes y la exposición a ellas y la mejora del mapeo y la evaluación de los niveles de exposición de las personas a fuentes de radiación ionizante en la vida cotidiana en su entorno, tanto ocupacional como cuando se someten a procedimientos médicos y como resultado de accidentes.

Otro punto fundamental son los estudios para una mejor comprensión de las posibles acciones y reacciones a la radiación en diversos aspectos, como el nivel molecular y biológico y la población que está expuesta a la radiación. Esto conlleva la necesidad de realizar estudios sobre los efectos sobre la salud y el medio ambiente, basados en evidencias, en particular en el rango de dosis bajas y de la exposición crónica, relacionados tanto con el cáncer como con las enfermedades no cancerosas.

Otro apartado a tener en cuenta son las evidencias de efectos ambientales relacionados tanto con la reproducción como con la supervivencia y estimaciones sólidas del riesgo para las poblaciones de biota no humana después de la exposición a la radiación.

Por ello entre los futuros proyectos para el periodo 2025-2029 que están en fase de análisis y preselección UNSCEAR tiene previsto la realización de estudios relativos a radiosensibilidad individual, impacto de la radiación en la biota de la industria nuclear, efectos de la radiación en el sistema inmune, enfermedades del sistema respiratorio, opacidades del cristalino (aparición de cataratas) por efecto de las radiaciones, efectos transgeneracionales y síndrome de irradiación aguda.

asesorar al Gobierno, a los tribunales de Justicia y a las autoridades autonómicas y locales. Actualmente, la representante nacional en las sesiones de UNSCEAR es Ana Hernández Álvarez, jefa del Gabinete de la Dirección Técnica de Protección Radiológica (DPR) del CSN, y como tal estuvo en su 70ª sesión.

Las reuniones anuales de este comité tienen en todos los casos una estructura similar: una reunión previa de los representantes nacionales a fin de revisar los temas a tratar e identificar los aspectos más relevantes, aprobar la agenda de la reunión y repasar las consideraciones de la Asamblea General de Naciones Unidas derivadas de la presentación en la misma del informe de UNSCEAR del anterior periodo de sesiones. Además, se realiza una discusión técnica de los diferentes documentos en elaboración y de los comentarios recibidos de los diferentes países que forman parte de UNSCEAR.

"Cada año se constituye la delegación nacional de cada país, de la cual forma parte el representante nacional, junto con un representante suplente y un conjunto de expertos, cuyo número varía en función de lo que se decida anualmente por cada país para la sesión de que se trate. En el caso del 70º periodo de sesiones el representante nacional suplente ha sido Beatriz Robles Atienza, del CSN, y la delegación se completaba con tres personas en calidad de expertos, una a propuesta del Ministerio de Sanidad, José Miguel Fernández Soto; otra que propone el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), Fernando Usera Mena; y otra propuesta por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Danyl Pérez Sánchez, explica Ana Hernández, que ha sido la representante de España ante UNSCEAR desde la sexagésimo quinta sesión, en 2018, tras ser nombrada por el Ministerio de Exteriores.

Con antelación a la celebración de la reunión anual de este Comité, se remiten los borradores de los diferentes documentos a los diferentes países para comentarlos. Posteriormente, en las sesiones técnicas específicas del correspondiente periodo de sesiones, se analizan los comentarios más relevantes y se revisa el contenido total de los borradores.

"En los periodos de sesiones se habla de muchas cosas. Se trabaja sobre borradores que se están evaluando. Todo ello se somete a la opinión de los distintos países. También la secretaria de UNSCEAR propone temas para discutirlos y debatirlos. Los temas que se abordan tienen un amplio espectro y cubren todos los ámbitos donde están presentes las radiaciones ionizantes, tanto de origen natural como de origen artificial", dice Hernández.

Un importante trabajo del grupo de expertos es la selección de aquellas publicaciones que deberán tenerse en cuenta en la elaboración de los informes, con criterios de objetividad y teniendo en cuenta la calidad científica de las mismas.

"UNSCEAR no es un organismo de investigación científica, así que los informes se hacen a través de la recopilación de datos mundiales, de todas las publicaciones que hay sobre un determinado tema. Entre la bibliografía disponible se selecciona aquella que cumpla con los criterios de calidad establecidos por este Comité como los más adecuados para su objetivo.

Para la elaboración de determinados documentos, adicionalmente se solicitan datos a los países miembros de este comité; por ejemplo, en relación con la utilización de las radiaciones ionizantes en el ámbito médico, dosis recibidas por la población a través de diferentes vías, como las producidas por la presencia de radón en la naturaleza, etc...

Los informes se elaboran por un grupo de expertos previamente seleccionados entre las personas propuestas por los países miembros, en un proceso coordinado por la secretaría de UNSCEAR y que debe contar con la aprobación de la presidencia de este Comité.

En la actualidad participan en uno de estos grupos los expertos españoles Danyl Pérez-Sánchez (Ciemat y miembro de la delegación española), Juan Pedro Bolívar Raya (Universidad de Huelva) y Rafael García Tenorio (Universidad de Sevilla).

Dentro del proceso de trabajo establecido por UNSCEAR para garantizar la calidad de los informes elaborados por los grupos de trabajo de expertos, resulta esencial la revisión de los borradores que realizan las delegaciones nacionales. En este aspecto, cabe destacar la colaboración y la importante aportación de los expertos españoles en el proceso de revisión de los documentos. Concretamente, en el año 2023, los miembros de la delegación española analizaron y comentaron por escrito los diferentes borradores remitidos previamente por la secretaría de UNSCEAR.

Según Hernández, perteneciente también como experta al grupo del artículo 31 de Euratom, "UNSCEAR mantiene contacto fluido con otras organizaciones, como la Organización Mundial de la Salud, la Comisión Internacional de Protección Radiológica y la Organización Internacional de la Energía Atómica, todo ello encaminado a crear sinergias muy beneficiosas para todos. Por supuesto, para los gobiernos es un Comité que otorga mucha confianza, ya que los informes que se elaboran son de gran calidad".

UNIS

El Vienna International Centre, donde se celebran las reuniones del Comité UNSCEAR.

Laboratorio de Calibración y Dosimetría del Instituto de Técnicas Energéticas.

Calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección para la medida de la radiación y contaminación en instalaciones radiactivas

La Instrucción IS-28, de 22 de septiembre de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría, establece los requisitos para garantizar un adecuado nivel de seguridad y protección radiológica en el funcionamiento de las instalaciones radiactivas con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales. La especificación técnica I.6 dispone que "La vigilancia radiológica de la instalación se realizará mediante detectores de radiación/contaminación apropiados. Se establecerá un programa de calibraciones y verificaciones de los sistemas de detección y medida de la radiación, teniendo en cuenta aspectos como recomendaciones del fabricante, recomendaciones del laboratorio de calibración que efectúe las mismas, resultados de las verificaciones periódicas, amplitud y severidad de uso, condiciones ambientales, exactitud buscada en la medida, etc. Para el establecimiento de este programa se podrá tomar como base las recomendaciones contenidas en la norma UNE EN 30012-1 o su equivalente ISO 10012-1". La Guía de Seguridad del CSN GS-05.17 Calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección para la medida de la radiación y contaminación, de 7 de diciembre de 2022, se ha elaborado con el objeto de facilitar a las instalaciones radiactivas el cumplimiento de la especificación técnica I.6 de la Instrucción IS-28, estableciendo recomendaciones para confeccionar un adecuado procedimiento de calibración y verificación y seleccionar monitores de radiación apropiados en función de las características específicas de la instalación radiactiva.

■ Texto: **Fernando Andrés López** | Inspector del Área de Inspección de Instalaciones Radiactivas del CSN ■

El descubrimiento de las radiaciones ionizantes, llevado a cabo por la comunidad científica entre finales del siglo XIX y principios del XX, propulsó el uso de las mismas en los campos de la medicina y de la investigación.

Desde el inicio de su utilización se observaron los primeros efectos nocivos para la salud, en científicos, médicos y pacientes. En las primeras décadas del siglo XX el conocimiento obtenido sobre el riesgo para la salud del uso de las radiaciones ionizantes puso de relieve la necesidad de buscar mecanismos de protección para las personas que pueden verse sometidas a las mismas, ya sea por su trabajo o como pacientes en tratamientos médicos.

1. Monitores de radiación

Para poder llevar a cabo esta tarea de protección era fundamental poder medir la radiación a la que se está expuesto. En 1911, el físico escocés Charles Thomas Rees Wilson inventó la cámara de ionización. En 1928, los físicos alemanes Hans Geiger y Walther Müller, desarrollaron el tubo Geiger-Müller, que podía detectar radiación alfa y beta, e incluso gamma. En décadas posteriores se desarrollan los contadores proporcionales, de centelleo y semiconductores, siendo muy significativos los avances a finales del siglo XX y principios del XXI, permitiendo disponer de equipos más precisos, con mayores rangos de medida, más portátiles, para usos en atmósferas explosivas, etc. Toda esta instrumentación hace posible la medida de distintas magnitudes y unidades de medida relacionadas con la radiación ionizante para diferentes usos y necesidades.

Uno de los elementos prioritarios e indispensables para asegurar la protección radiológica del público y los trabajadores y las trabajadoras frente a las radiaciones ionizantes es disponer de una instrumentación para la medida de la radiación, con diferentes acepciones: monitor de radiación, detector de radiación, instrumentación de radioprotección, equipo de medida de la radiación, dosímetro personal, etc.

Estos dispositivos nos permiten medir las tasas de dosis (μSv/h), la actividad radiactiva (cps), la actividad superficial (contaminación, en bequerelios) y la dosis absorbida (Sv), unidades radiactivas básicas para la toma de medidas.

El uso de estos dispositivos es fundamental en las instalaciones radiactivas y se utiliza para un amplio rango de acciones, entre las que destacan:

- Clasificación de zonas radiológicas.
- Actuaciones en emergencias radiológicas.
- Sistemas de seguridad en recintos blindados.
- Evaluación de los riesgos de los trabajos que impliquen exposición a radiaciones ionizantes.
- Medida de las dosis debidas a exposición a radiaciones tanto para los trabajadores como para el público
- Comprobación de blindajes.
- Medida de contaminación superficial.
- Control de acceso a zonas con potencial irradiación.
- Control previo de hermeticidad.
- Comprobación de fugas de equipos generadores de radiación.
- Medida rápida de contaminación exterior individual.
- Espectrometría e identificación de radioisótopos, etc.

En la actualidad, los monitores de radiación son empleados en centrales nucleares, instalaciones radiactivas del ciclo del combustible y del ámbito industrial, médico, investigador, docente, aduanero, etc. El personal de Consejo de Seguridad Nuclear y el personal técnico de instalaciones nucleares y radiactivas, entre otros, son usuarios de este tipo de equipamiento.

El número de dispositivos que se utilizan en organismos e instalaciones radiactivas es muy significativo. La diversidad tecnológica de los mismos y la variedad de fines para los que se usan, hace necesario disponer de un mínimo conocimiento para garantizar y asegurar el uso idóneo.

Una parte fundamental para un correcto mantenimiento y uso de los monitores de radiación es el establecimiento de procedimientos que aseguren una correcta verificación y una adecuada calibración.

Monitores de radiación, desde la izquierda: Fluke RaySafe 452, Thermo Scientific RadEye PRD, RaySafe X2 Survey y Mirion Radiagem 2000.

2. Instalaciones radiactivas

En relación a las instalaciones radiactivas, el Consejo de Seguridad Nuclear, establece los requisitos que éstas deben cumplir en cuanto al equipamiento de radioprotección, a través de las especificaciones técnicas de sus autorizaciones, entre otros muchos aspectos.

En las décadas de 1970 y 1980, las especificaciones técnicas de funcionamiento que debían cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría, en cuanto a los monitores de radiación, establecían en las resoluciones de autorización el siguiente requisito: "La instalación dispondrá de detectores de radiación y contaminación adecuados para la vigilancia radiológica ambiental, los cuales serán verificados y calibrados periódicamente". Posteriormente, en los años 90, se añadió "La calibración se efectuará por un laboratorio legalmente acreditado".

A partir de la publicación de la instrucción del CSN IS-28, de 22 de septiembre de 2010, se debe dar cumplimiento a la especificación I.6 citada anteriormente.

Debido a la variedad de instalaciones, a los diferentes fines del uso de los monitores de radiación y a la diversidad de los profesionales que manejan estos dispositivos, es indispensable contar con documentación de apoyo que ayude a la elaboración de procedimientos de calibración y verificación, la elección de los monitores de radiación más adecuados y el uso de las unidades de medidas correctas, entre otras cosas.

Existen multitud de tipos de instrumentos de medida de la radiación ionizante. Los hay fijos para medida de tasas de dosis ambientales y/o direccionales, portátiles para medida de tasas de dosis ambientales y/o direccionales y/o contaminación superficial, dosímetros personales electrónicos (también denominados dosímetros de lectura directa), para medida de radiación gamma y/o beta y/o neutrónica, equipos para la realización de espectrometría, etc.

Fuente radiactiva encapsulada para control de procesos.

Todos estos aspectos se han tenido en cuenta a la hora de elaborar la Guía de Seguridad 5.17.

3. Guía de seguridad 5.17

En esta Guía se recoge la experiencia acumulada desde la creación del CSN, en el año 1980, en relación a los monitores de radiación, tanto en el uso propio por parte del personal del CSN como en cuanto a su utilización en las instalaciones radiactivas.

A lo largo de estos años, se ha podido comprobar el auge existente en el desarrollo tecnológico de este tipo de dispositivos y la necesidad intrínseca de un uso apropiado de los mismos para asegurar una adecuada protección radiológica de los trabajadores expuestos, del público en general y del medio ambiente.

El uso y el mantenimiento de los mismos requiere de unos requisitos mínimos que no siempre se cumplen de forma apropiada si no se dispone de la formación e información suficiente.

Dicha Guía se centra en su mayor parte en proporcionar la información necesaria para la elaboración de los procedimientos de calibración que incluyan una elección correcta de la misma, redactar protocolos de verificación adecuados a las necesidades de la instalación, los elementos a considerar a la hora de seleccionar la instrumentación apropiada, las acciones necesarias para que los usuarios de los mismos tengan la seguridad de que las medidas que están llevando a cabo son lo más eficientes posibles, etc.

4.1 Proceso de elaboración

Para la elaboración de la Guía 5.17 se ha utilizado toda la experiencia acumulada en el Consejo de Seguridad Nuclear en relación con la evaluación e inspección y de los aspectos relacionados con la instrumentación de radioprotección. Se ha revisado la documentación técnica interna; los documentos emitidos por orga-

nismos reguladores homólogos al CSN, como la National Regulatory Commission; y publicaciones realizadas por el Organismo Internacional de la Energía Atómica y por la Organización internacional para la normalización (ISO/IEC) a través de sus normas técnicas. Así mismo se ha contado con la colaboración de algunas instalaciones radiactivas, unidades técnicas de protección radiológica, servicios de protección radiológica y laboratorios de metrología de radiaciones ionizantes.

El proceso de redacción se llevó a cabo entre marzo de 2020 y junio de 2021. Tras la fase de comentarios internos se redactó el borrador 1 a finales de febrero de 2022. Después del análisis de 130 comentarios externos, remitidos al CSN por las instituciones y grupos con interés en la materia, se procedió a la emisión del borrador 2, en junio de 2022. En diciembre del mismo año se publicó la versión final de la misma.

4.2 Estructura

La Guía de Seguridad se compone de los siguientes apartados:

Preámbulo

1. Objeto y ámbito de aplicación
2. Definiciones
3. Consideraciones generales
   3.1. Calibración en un laboratorio acreditado
   3.2. Calibración en un laboratorio certificado
   3.3. Verificación
4. Métodos de verificación
5. Informe de verificación
6. Requisitos aplicables a las instalaciones radiactivas para la calibración y la verificación
7. Referencias bibliográficas

Anexos

I. Instrumentación de radioprotección

II–VII. Verificaciones

VIII. Cálculo de la eficiencia en un monitor de contaminación superficial

IX. Procedimiento para calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección

A continuación, se presentan los principales asuntos que se tratan en los distintos apartados:

- En el *Preámbulo* de la Guía se indica la importancia que tiene el equipamiento de radioprotección, así como la finalidad y la relevancia de los procesos de calibración y verificación. Igualmente, se incluye el contenido literal de la especificación técnica I.6 detallada en la Instrucción del CSN IS-28.

- En *Objeto y ámbito de aplicación* se indica que la finalidad del documento es facilitar la información necesaria a los titulares de las instalaciones radiactivas para que lleven a cabo la elaboración un procedimiento de calibración y verificación que permita un adecuado uso y mantenimiento de los mismos y una selección del equipamiento de medida más apropiado a cada tipo de instalación.

  Se incide en el tipo de instrumentación al que va dirigida la Guía, que son todos aquellos equipos que se usen en las instalaciones radiactivas para medida de tasa de dosis equivalente ambiental o direccional, dosis acumulada, actividad radiactiva y contaminación superficial. Igualmente, se establece que la Guía no se aplica a aquellas fases previas a la comercialización.

- En *Definiciones* se detalla, respecto de la Guía, el significado de los términos verificación, calibración, laboratorio acreditado, fuentes de referencia e instrumentación de radioprotección.

- En el apartado de *Consideraciones generales* se trata de aclarar las diferencias entre laboratorios de calibración acreditados y laboratorios de calibración certificados, criterios para la elección de una adecuada calibración y para el establecimiento de la periodicidad de la calibración, etc. También se referencian las normas técnicas que deben seguir esos instrumentos y la necesidad de disponer de un certificado de calibra-

Medición de radiación en una instalación radiactiva.

ción emitido por un laboratorio metrológico acreditado o laboratorio de calibración certificado (frente a fuentes radiactivas o calidades de haces de rayos X) a la hora de adquirir el instrumento. Respecto a la verificación, se establecen criterios a seguir por parte del personal que realice la prueba de verificación, y los materiales necesarios y, además, se identifican aspectos como la reproducibilidad, repetitividad, geometría y distancia.

- En *Métodos de verificación* se desarrollan las metodologías más habituales de verificación, basadas en las que habitualmente se usan en organismos reguladores, instalaciones radiactivas, servicios de protección radiológica y unidades técnicas de protección radiológica. También se define lo que es una fuente de referencia y, en función de la misma y de otras características de la instalación, qué tipo de verificación puede ser llevada a cabo.

  En diferentes subapartados se dividen y comentan las distintas fases de las que se compone un proceso de verificación.

- En el apartado *Informe de verificación* se detalla qué datos se deben incluir en los informes y en *Requisitos aplicables a las instalaciones radiactivas para la calibración y la verificación* se resumen los requisitos mínimos que se deben cumplir para llevar a cabo una adecuada metodología para la calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección.

- El Anexo I, *Instrumentación de radioprotección,* se divide en dos apartados. El primero Características básicas de los instrumentos de radioprotección, que se desarrolla de forma más amplia posteriormente (Elección del monitor de radiación), y el segundo, Instrumentación de radioprotección en función del tipo de radiación y/o contaminación, que muestra las diferentes tecnologías existentes para la medida de los distintos tipos de radiación.

En las instalaciones radiactivas médicas se debe vigilar la radiación que reciben tanto los pacientes como los profesionales sanitarios.

- En los Anexos II al VII se aportan fichas de verificación con diferentes metodologías, para facilitar la implementación de dicho proceso a la instalación radiactiva de manera rápida y sencilla. Estas fichas incluyen verificación frente a fuente radiactiva encapsulada con decaimiento, verificación frente a fuente radiactiva encapsulada con muy largo periodo de decaimiento, verificación frente a monitor de referencia, uso de la constante gamma y verificación frente a fuentes radiactivas no encapsuladas.

- En el Anexo VIII se detalla como efectuar un cálculo de eficiencia.

- En el Anexo IX se proporciona un documento tipo sobre la estructura que debe definir un procedimiento de calibración y verificación, así como los diferentes apartados mínimos que debe incluir.

Calibración

La calibración es un proceso mediante el cual se puede establecer la relación entre los valores indicados por un instrumento y los correspondientes valores conocidos de un patrón de referencia. Es un proceso, que, cumpliendo con ciertos requisitos técnicos, es considerado fundamental para conocer cómo se comporta un equipo en diferentes rangos de medida respecto a una fuente radiactiva.

Los monitores de radiación deben disponer como mínimo de un certificado de calibración emitido por el fabricante, por un laboratorio de calibración certificado o por un laboratorio de calibración acreditado. La gran mayoría de fabricantes disponen de laboratorios de calibración certificados. Tanto éstos como los laboratorios de metrología de las radiaciones ionizantes acreditados deben cumplir con una serie de especificaciones que se desarrollan en la Guía de Seguridad. Los laboratorios de calibración certificados cumplen con ciertas características, reseñadas en la Guía, que les hacen ser de mucha utilidad y competencia. En cuanto a los laboratorios de calibración metrológica de las radiaciones ionizantes, deben disponer de acreditación en la norma ISO/IEC 17025 o una acreditación internacional emitida por la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM) u organismo similar. En España, actualmente, existen cuatro laboratorios de este tipo de acreditación. El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) de Madrid, el Instituto de Técnicas Energéticas (Inte) de Barcelona, el Centro Nacional de Dosimetría (CND) de Valencia y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de Madrid.

Los laboratorios de metrología acreditados aportan ciertas ventajas, como el disponer de un reconocimiento de su competencia técnica por un organismo de acreditación y reconocimiento internacional de los resultados, o disponen de algún aval de los resultados ante clientes y administraciones y se evalúa la competencia técnica del personal.

Los laboratorios de calibración certificados asociados a fabricantes disponen de certificación de sus sistemas de gestión de calidad (ISO 9001) en calibración de instrumentos de medida de radiaciones ionizantes, certificado de trazabilidad metrológica a patrón primario y/o nacional, que asegura la trazabilidad posterior y disminuye los errores, fuentes radiactivas que correspondan al tipo de radioisótopo recomendado por las normas ISO. Los criterios generales de trabajo de estos laboratorios se deben basar en la ISO/IEC 17025 (o en la norma ANSI/NCSL-Z-540.3) y, al estar asociados a fabricación, conocen a la perfección sus equipos y son los únicos que pueden reparar y ajustar.

INGEFISIC

Calibración de detectores de radiación ionizante.

Las calibraciones realizadas en estos laboratorios son necesarias y de utilidad en función de las características de la instalación radiactiva, los procedimientos de calibración y verificación evaluados en el CSN, casos de reparación y/o ajuste, calibración tras fabricación, etc. No pueden ser usados en sustitución de las calibraciones requeridas en un laboratorio metrológico acreditado que así estén establecidas en el programa de calibración de la instalación.

Antes de proceder a la calibración de un instrumento es necesario conocer las fuentes patrón del laboratorio y clarificar cuál de las siguientes magnitudes son las de interés: tasa de dosis equivalente personal, dosis equivalente personal, tasa de dosis equivalente ambiental y direccional, dosis equivalente ambiental y direccional y actividad superficial. Además, habrá que tener en cuenta tipos y características de los radioisótopos y calidades de haces de rayos X.

La instalación radiactiva debe seleccionar el radioisótopo o calidad de haz de rayos X igual a la principal fuente radiactiva/equipo emisor de radiación presente en la instalación. Hay que señalar que para los equipos diseñados bajo las normas IEC y para medida de tasa de dosis equivalente ambiental, en caso de calibrar frente a una fuente encapsulada de ^{137}Cs, si la respuesta del monitor está dentro de tolerancias, se puede afirmar con cierta seguridad que lo será también para el rango de energía para el que ha sido diseñado. De igual importancia es elegir calibraciones para los rangos o escalas de medida con presencia o potencial presencia en la instalación, aunque en este caso lo normal es que se calibre en cuatro/cinco rangos de medida.

Con estos datos y las necesidades de medida de nuestra instalación y capacidades del equipo de medida, se puede proceder a la elección de una calibración lo más correcta posible.

Los resultados nos proporcionan, entre otros datos, dos puntos clave del estado de nuestro equipo. En primer lugar, la desviación respecto al valor convencionalmente "verdadero" y un "factor de calibración" para obtener la medida más exacta posible.

Los valores obtenidos deben estar dentro de las tolerancias que se indican en las normas. En tasa de dosis equivalente ambiental y direccional, la variación de la respuesta del equipo no debería superar el -15 % y +22 % para radiación debida a partículas beta y fotones, y -17 % y +25 % para neutrones, del valor convencionalmente verdadero establecido por el laboratorio y, si es así, habrá que prestar atención al comportamiento del equipo y tomar las acciones oportunas (comprobar anteriores calibraciones para comparar con la desviación inicial, mandar a reparar al fabricante, seguimiento periódico, disminución de los períodos de calibración, aumento de la periodicidad en verificación...). Si se supera el 40 % se debe enviar el monitor al fabricante a reparar o darlo de baja. Para monitores de contaminación, la respuesta respecto a la tasa de emisión superficial no debería diferir en más de un 20 % (conjunto de detección/monitor más sonda) -25 % (monitor de contaminación) del valor fijado por el fabricante para el radionucleido especificado y en las mismas condiciones de uso.

La periodicidad recomendada para la calibración es extremadamente variable. Puede ser suficiente con una primera calibración (o calibración en origen) hasta una calibración periódica anual o bienal. Va a depender de tantos factores que debe ser el usuario del mismo el que establezca la sistemática, siendo el CSN, en último lugar, el que evalúe si es o no adecuada.

Algunos de estos factores son:

- Recomendaciones del fabricante
- Condiciones ambientales de uso
- Riesgo radiológico asociado al tipo de trabajo
- Lugares de uso del equipo (laboratorio, fábricas, campo...)
- Alcance de uso (vigilancia radiológica ambiental, detectar contaminación, altas radiológicas hospitalarias...)
- Intensidad de uso
- Tasas de dosis máximas a cuantificar (desde instalaciones con valores de unidades de μSv/h hasta instalaciones donde se pueden llegar a mSv/h o valores superiores)
- Fiabilidad de la verificación periódica

6. Verificación

La verificación es otro de los procesos de importancia para el mantenimiento y uso de un instrumento de medida de la radiación. Podemos definirla como el proceso por el que se comparan las medidas proporcionadas por el instrumento con las de un equipo calibrado y de calidad metrológica igual o superior al equipo a verificar, o bien los valores de un patrón conocido, con el fin de confirmar que el equipo mide con un error menor al especificado por el fabricante o menor del requerido para la realización de un determinado trabajo.

Es fundamental en este proceso establecer cuál es nuestra fuente de referencia o patrón interno. Estas fuentes pueden ser fuentes radiactivas encapsuladas (con periodos de semidesintegración cortos, medios o largos), fuentes radiactivas no encapsuladas, equipos generadores de radiaciones ionizantes y fuentes naturales de radiación.

Con la verificación periódica podemos afirmar que nuestro equipo sigue midiendo con la suficiente seguridad como para el fin que nos es necesario. Dicho proceso puede ser realizado de muy diversas maneras, ampliamente explicadas en la Guía. Hay que tener en cuenta el tipo de instalación, el riesgo radiológico y la finalidad del equipo de medida, entre otros aspectos. Por ejemplo, en el caso de instalaciones cuya información buscada sea fuente irradiando/fuente blindada, no necesitamos una verificación exhaustiva, únicamente funcional. En aquellas donde el monitor de radiación se usa para la búsqueda de fuentes radiactivas, los criterios de exactitud no son tan importantes y es práctico y útil que el equipo sobreestime. En las instalaciones donde sea necesario una precisión mayor en la medida, el procedimiento de verificación debe ser más preciso y robusto, estableciendo criterios específicos para que, en caso de que los resultados se desvíen de los rangos esperados, se tomen las acciones pertinentes, desde aumentar la periodicidad de la calibración a usar otras fuentes de referencia o mandar el equipo al fabricante, calibrarlo, etc.

La verificación puede ser realizada tanto por la propia instalación como por entidades externas (fabricantes, unidades técnicas de protección radiológica, servicios de protección radiológica, etc).

Cuanto mayor sea la periodicidad de nuestra verificación, mayor y mejor conocimiento tendremos del estado de nuestro equipo. Por ello, es recomendable establecer verificaciones al menos de manera semestral.

La Guía de Seguridad 5.17 indica diferentes metodologías para seguir un procedimiento de verificación que cumpla con unos requisitos mínimos. Puesto que las guías no son de obligado cumplimiento, los usuarios pueden seguir métodos y soluciones diferentes al contenido de las mismas, siempre y cuando estén debidamente justificados.

Gammágrafo.

7. Elección del monitor de radiación

La Guía de Seguridad 5.17 también incluye criterios sobre las características que hay que observar a la hora de elegir el instrumento de radioprotección más apropiado. Este debe ser seleccionado en función del tipo y características de la emisión de radiación principal en la instalación. Hay que tener en cuenta el tipo de radiación que el equipo puede medir, el rango energético que es capaz de detectar, el rango de medida (debería cubrir hasta los potenciales riesgos radiológicos que puedan ocurrir en la instalación), la eficiencia (respuesta en función de la energía y/o radioisótopo), la respuesta angular y la magnitud/unidad de medida buscada. Otras características a tener en cuenta son el tiempo de respuesta, la sensibilidad, el factor de conversión, la geometría de eficiencia (2π o 4π), el límite de escala en unidades, la saturación, la escala logarítmica o lineal y analógica o digital, la facilidad de uso, la iluminación, el audio, la respuesta a diferentes ambientes (temperatura, humedad, campos magnéticos, radiofrecuencias, etc.), la batería, el tamaño, el peso, la portabilidad, la robustez, la fiabilidad, la utilidad y los costes de mantenimiento.

Si en la instalación se dispone de una fuente de radiación que emite a 50 kV, no puede adquirir un equipo cuyo rango de energía comience en 80 kV; si en la instalación se dispone de una fuente de radiación beta, no se puede adquirir un equipo que mida sólo radiación gamma; si en nuestra instalación se pueden esperar resultados de medida desde pocos μSv/h hasta Sv/h o centenares de μSv/h, el equipo no debe saturarse a 250 μSv/h; si la principal medida que se precisa hacer en la instalación es de contaminación superficial, el equipo debe medir en bequerelios por unidad de superficie o en cps (disponiendo del factor de conversión para cada radioisótopo), etc.

Los monitores deben presentar las medidas en unidades del sistema internacional, tal y como se establece en las normas UNE de instrumentación de radioprotección, así como por el establecimiento de dicho criterio desde 1986 en la Unión Europea.

Cada equipo de medida debe ir acompañado de un certificado de calibración frente a fuentes radiactivas o calidades de haces de rayos X. Además, deben ir acompañados de un certificado de calidad que incluya la información establecida en las normas IEC mencionadas en la Guía de Seguridad.

Los instrumentos de radioprotección deben tener una sensibilidad mínima de detección adecuada a las medidas que se pretenden realizar y se debe considerar también la importancia buscada en la exactitud de la medida. En algunas instalaciones radiactivas es un factor determinante.

También hay que tratar de seleccionar aquel equipo de medida cuya curva de respuesta (eficiencia) respecto a la radiación predominante en la instalación (tipo y energía) sea lo más próxima a la unidad, para así asegurar una medición lo más fidedigna posible.

8. Conclusiones

Debido a la importancia del equipamiento para la medida de las radiaciones ionizantes en las instalaciones radiactivas, siendo un elemento clave para la protección de los trabajadores, el público y el medio ambiente, se consideró por parte del CSN la oportunidad de elaborar y publicar una Guía de Seguridad que permitiera orientar y facilitar a los usuarios el cumplimiento de los requisitos asociados a esta documentación.

La Guía tiene por objeto, en resumen, homogeneizar criterios en las instalaciones radiactivas, facilitar la elaboración de los procedimientos de calibración y verificación, proponer las metodologías de verificación más frecuentes, útiles y sencillas, aportar la información necesaria para elegir la calibración más adecuada, proporcionar criterios sobre las características a tener en cuenta para la adquisición de un equipo de radioprotección y los documentos que deben acompañar a los mismos.

Regulación de la evaluación del impacto radiológico ambiental

■ Texto: **Javier Guillen[1], Almudena Real[2], Alicia Escribano[2], Paloma Rodríguez[1], Danyl Pérez[2]** | [1] Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura (Laruex) | [2] Unidad de Protección Radiológica del Público y del Medio Ambiente. Departamento de Medio Ambiente. Ciemat ■

Para cualquier proyecto cuya ejecución pueda producir efectos radiológicos significativos sobre el medioambiente, es necesario incluir en la evaluación de impacto ambiental (EIA) una evaluación del impacto radiológico para garantizar, *a priori,* una adecuada protección ambiental del territorio en donde se vaya a implantar dicho proyecto.

Tradicionalmente la evaluación de impacto radiológico ambiental se centraba en garantizar la protección de los seres humanos. Sin embargo, se ha producido un profundo cambio de enfoque, recomendándose actualmente que se demuestre explícitamente que otras especies (flora y fauna) están adecuadamente protegidas (ICRP, 2007).

En aquellos proyectos que deban ser autorizados según el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (Real Decreto 35/2008), el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) realizará una evaluación del impacto radiológico ambiental, valorando el posible impacto radiológico en operación normal y, en caso de accidente, aplicando la normativa vigente sobre seguridad nuclear y protección radiológica (Ley 33/2007).

El proyecto Regulación de la Evaluación del Impacto Radiológico Ambiental, financiado por el CSN en su convocatoria de ayudas para la realización de proyectos de I+D+i de 2021, tiene como objetivo principal desarrollar metodologías que permitan realizar las evaluaciones de impacto radiológico ambiental para entornos geoclimáticos como los dominantes en España, en donde exista una instalación nuclear y/o radiactiva, o se pueda razonablemente proponer el proyecto de implantarla. Dichas metodologías permitirían al CSN definir criterios reguladores y elaborar guías concretas para realizar evaluaciones del impacto radiológico ambiental de cualquier futuro proyecto nuclear y/o radiactivo en España con repercusión medioambiental. Los ambiciosos objetivos del proyecto hacen imprescindible la colaboración de la Universidad de Extremadura y el Ciemat, dos grupos con amplia experiencia en la evaluación del impacto radiológico ambiental y en la protección radiológica del medioambiente.

El punto de partida del proyecto ha sido realizar una revisión bibliográfica exhaustiva para conocer las aproximaciones utilizadas internacionalmente para llevar a cabo evaluaciones de impacto radiológico ambiental. Para particularizar dichas aproximaciones a las características geoclimáticas de los ecosistemas españoles, se han identificado las instalaciones nucleares y radiactivas en nuestro país, recopilándose la información disponible sobre las características de los emplazamientos (ecosistemas) en los que éstas se encuentran (Figura 1). Para cada uno de dichos ecosistemas, se están diseñando los mecanismos con los que poder realizar una evaluación del impacto radiológico ambiental integral, prestando una especial atención a las especies más vulnerables de flora y fauna existentes en cada uno de ellos.

Figura 1. Clasificación climática según Köppen.

Figura 2. Mapas del embalse de Arrocampo (izquierda) y Valdecañas.

Las instalaciones nucleares y radiactivas de España estudiadas, en operación normal, incluyen: las centrales nucleares Almaraz, Ascó, Cofrentes, Garoña, Trillo y Vandellós II; el centro de almacenamiento de residuos El Cabril, el centro de recuperación de inertes (Huelva), la fábrica de elementos combustibles de Juzbado y la planta Quercus de fabricación de concentrados de uranio.

A fin de evaluar el impacto radiológico sobre la biota, se ha usado la herramienta ERICA (Brown y col., 2008), que sigue un enfoque gradual y permite, utilizando un número reducido de datos específicos del escenario, realizar un cribado de las situaciones de exposición que pueden tener un impacto en la biota. Esta aproximación permite optimizar los recursos empleados para descartar aquellos escenarios en los que el riesgo radiológico para la biota es despreciable y en los que no es necesario realizar evaluaciones más detalladas. Como valores de partida, en las instalaciones mencionadas se seleccionaron varias estaciones de muestreo, recopilándose para cada una de ellas la información (instalación, estación, tipo de muestra, radionucleido y concentración de actividad) reportada en la Red de vigilancia en el entorno de instalaciones (PVRA), disponible en la web del CSN, considerándose las concentraciones de actividad máximas (a fin de considerar el escenario más desfavorable) para los diferentes radionucleidos reportados en PVRA (37 estaciones de ecosistema terrestre y 49 del ecosistema acuático).

Para la verificación de los desarrollos metodológicos del impacto radiológico ambiental de una instalación nuclear, es necesario realizar un análisis comparativo entre el estado inicial (antes de la construcción de la instalación) y el estado final (tras su construcción y puesta en marcha). Sin embargo, este planteamiento es difícilmente ejecutable en la actualidad, ya que el desarrollo normativo de impacto ambiental ha sido posterior a la construcción de dichas instalaciones. Por ese motivo, y con objeto de verificar experimentalmente el desarrollo metodológico de la evaluación de impacto radiológico sobre la biota, se han escogido dos ecosistemas acuáticos con condiciones medioambientales similares (Figura 2), uno de ellos afectado por una instalación nuclear (embalse de Arrocampo, empleado para la refrigeración de la central nuclear Almaraz) y el otro no (embalse de Jerte, que abastece a Plasencia).

Se ha realizado una recolección sistemática de muestras similares en ambos embalses durante aproximadamente un año, comenzando en abril de 2022, incluyendo muestras de agua superficial, sedimento y biota (peces, principalmente carpas, y flora, principalmente juncos). En cada una de las muestras se ha determinado el contenido radioactivo (medida de la concentración de actividad de diferentes radionucleidos artificiales y naturales). Adicionalmente, se han tomado muestras de agua superficial y sedimentos del embalse de Valdecañas, localizado aguas arriba del embalse de Arrocampo, a fin de poder discernir si la presencia de radionucleidos en este último es debida a la influencia de la central nuclear Almaraz, o ya estaba presente en el río Tajo antes de su entrada en Arrocampo.

Los resultados obtenidos en la evaluación de impacto *in situ* serán contrastados con los resultados obtenidos en las evaluaciones de impacto radiológico en biota realizadas con las herramientas ERICA para los mismos escenarios.

Una vez definidas las metodologías que permitan realizar las evaluaciones de impacto radiológico ambiental para entornos geoclimáticos como los dominantes en España, estas se aplicarán a diferentes casos prácticos hipotéticos o basados en resultados experimentales (casos prácticos reales de España anteriormente descritos) para su validación.

La ambición es que la metodología desarrollada sea tan sencilla como sea posible para alcanzar los objetivos de protección necesarios. Una metodología por etapas, como la que se pretende desarrollar en el proyecto, permitirá optimizar el uso de recursos en función del impacto ambiental esperado, centrando los esfuerzos en aquellos proyectos en los que se requiera un análisis más detallado debido a un mayor impacto ambiental esperado. Adicionalmente, se elaborará una guía práctica sobre cómo aplicar la metodología desarrollada a distintos escenarios de nuestro país, dirigida a los usuarios interesados. La metodología podrá aplicarse como base reguladora en las evaluaciones de impacto radiológico ambiental de las instalaciones nucleares y radiactivas en España a las cuales les sea preceptiva.

DEPOSITPHOTOS

El cuerpo humano alberga más de 30 billones de microorganismos, que forman la microbiota

Nuestros inseparables compañeros de existencia

Estamos formados por unos 37 billones de células, pero, al mismo tiempo, hospedamos una cantidad similar de microorganismos. Es la denominada microbiota humana. En los últimos años los científicos han ahondado en sus múltiples funciones y en su importancia para mantener el equilibrio de nuestro organismo y nuestra salud. Las investigaciones más recientes confirman la relación entre los desequilibrios en la microbiota y diversas enfermedades que afectan al ser humano, desde alteraciones en el aparato digestivo a la ansiedad o la depresión.

Texto: **Noemí Trabanco** | periodista de ciencia

Hace menos de 10 años se estimaba que nuestro organismo contenía hasta 10 veces más células microbianas que células humanas. Los últimos estudios establecen una proporción más cercana a 1:1. Aun así, una no desdeñable cifra de más de 30 billones de microbios habita en nuestro cuerpo, desde la boca a la piel, desde los pulmones al tracto digestivo, entre otros. Esta microbiota está compuesta no solo de bacterias (aunque estas son las más abundantes y, probablemente, de las que más sepamos) sino también de hongos, virus y otros microorganismos.

Al conjunto de microbiota, sus genes y el ambiente que la rodea es a lo que se denomina microbioma y en los últimos años se ha avanzado notablemente en conocer su composición y su función en nuestros órganos. Los genes de estos microorganismos, unos 700 000, aportan moléculas indispensables para que se produzcan determinadas reacciones químicas. El ejemplo más popular es la digestión de alimentos vegetales y sus fibras. "Compuestos como los polifenoles,

que son antioxidantes, o los fitoestrógenos no podríamos absorberlos de no ser por nuestra microbiota", explica Francisco Guarner, médico especialista en aparato digestivo en el Centro Médico Teknon de Barcelona y miembro del Consorcio Internacional del Microbioma Humano, del que fue presidente entre 2020 y 2021.

A partir de los carbohidratos provenientes de la fibra algunas bacterias intestinales son capaces de generar ácidos grasos de cadena corta, como el butirato. Estas moléculas son la principal fuente de energía de nuestras células intestinales. "La microbiota intestinal es la que tiene un volumen mayor y tiene un fuerte impacto sobre el sistema inmune, ya que en el intestino existen folículos linfoides donde se obtiene información de los microorganismos que pasan por nuestro tracto intestinal y se originan gran parte de los anticuerpos que circulan por nuestra sangre", añade Guarner.

Los expertos reconocen que no existe una única composición de la microbiota, ya que se trata de un sistema muy complejo y cambiante, que puede ser diferente entre individuos y, aun así, estar en equilibrio. En lo que la comunidad científica está de acuerdo es en la importancia de que sea lo más diversa posible, de forma que aumente la resiliencia frente a los cambios externos. "Cuanto más diverso sea el microbioma, más genes aportará y más capacidad funcional y de recuperación tendrá. Puede darse una redundancia funcional, por lo que, en una situación de desequilibrio, tenemos varios equipos que pueden realizar esa misma función en caso de que uno falle", apunta Guarner.

Microbiota y dieta

La relación entre dieta y microbiota ha cobrado especial relevancia en la nutrición humana en los últimos años. Mantener una dieta adecuada no nos hace ganar nuevas bacterias, pero permite mantener aquellas que nos aportan beneficios. La alteración de la microbiota en enfermedades como la colitis ulcerosa, la enfermedad de Crohn o la celiaquía es una realidad, pero en casi cualquier patología digestiva se están encontrado alteraciones en los microorganismos intestinales. "Desde 2008, que empezaron a realizarse estudios comparativos entre personas sanas y personas con patologías digestivas, se han visto diferencias claras. Hasta ahora no sabemos qué parte de esos cambios son consecuencia de la enfermedad o la causa de esta, pero sí es claro que, por ejemplo, enfermedades como el cáncer de colon, la celiaquía o la enfermedad de Crohn son más frecuentes en países industrializados, donde la microbiota es, en general, más pobre", detalla Francisco Guarner.

Francisco Guarner.

Toni Gabaldón.

Un término que también resuena frecuentemente cuando se habla de problemas digestivos y microbiota es disbiosis. "Una misma persona no va a tener la misma composición de microbiota a lo largo de su vida, y puede estar en equilibrio igualmente. La disbiosis vendría cuando la persona alcanza un equilibrio distinto, en el que generalmente hay menos bacterias de las que fermentan los alimentos vegetales. La microbiota pierde capacidad de producir ácidos grasos de cadena corta y se altera la permeabilidad intestinal", explica el doctor.

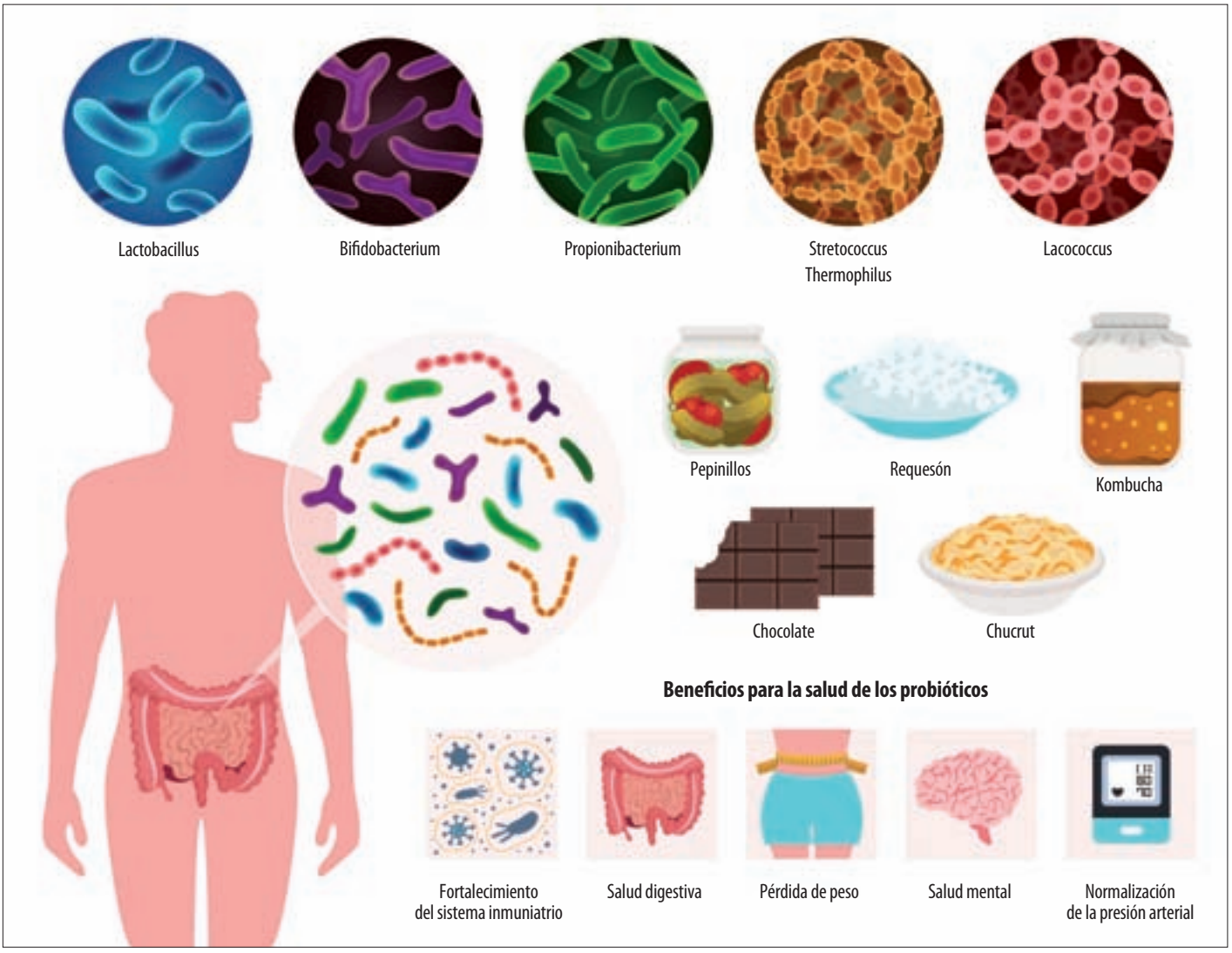
Existen diversos factores de riesgo que pueden fomentar la aparición de enfermedades de carácter digestivo, pero los expertos tienen claro que actuar a través de la dieta y el uso adecuado de antibióticos, que alteran significativamente nuestra microbiota, es clave para mejorar el estado de salud. "También existe la posibilidad de un trasplante de microbiota, pero esto parece tener eficacia solamente en personas que tienen episodios fuertes de diarrea por un tratamiento fuerte con antibióticos. En enfermedades como diabetes o trastornos

Staphylococcus aureus

Staphylococcus pyogenes

Staphylococcus pneumoniae

Enterococcus



Algunos organismos de la microbiota, alimentos probióticos que los proporcionan y efectos beneficiosos que producen.

funcionales del intestino los beneficios de esta alternativa no parecen estar tan claros", aclara Guarner.

Los investigadores estudian si esas diferencias en la microbiota pueden servir para detectar enfermedades de una forma más temprana. Ejemplo de ello es el test de diagnóstico precoz de cáncer de colon en el que trabaja el grupo de genómica comparativa del Instituto de Investigación en Biomedicina de Barcelona (IRB), liderado por Toni Gabaldón. Utilizan las muestras fecales de pacientes a los que se les realiza un test para búsqueda de sangre oculta (prueba realizada actualmente para la detección de cáncer de colon en pacientes con más de 50 años). "Cuando esta prueba es positiva se les realiza una colonoscopia, pero en muchos casos luego no se encuentra nada. Nosotros analizamos los microorganismos de muestras de unos mil pacientes y a través de inteligencia artificial determinamos si la colonoscopia era o no necesaria. Según los resultados podríamos evitar hasta un 30 % de estas pruebas", revela Gabaldón. "Ahora queremos probar que este tipo de análisis funciona en otros países, con poblaciones diferentes, y queremos usarlo fuera del contexto del screening de mayores de 50 años. El cáncer colorrectal está aumentando en gente más joven y son pacientes que van al médico cuando tienen ya una

Neisseria gonorrhoeae *Tetracoccus* *Sarcina* *Salmonella*

sintomatología grave. Si abaratamos este screening podría hacerse en más población", añade.

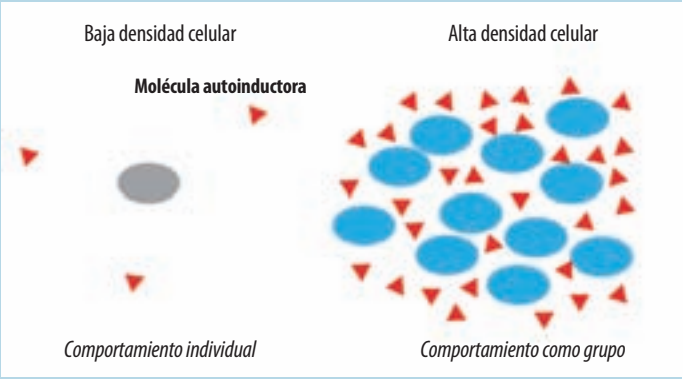
Las bacterias de nuestra microbiota también tienen un papel en la celiaquía o la obesidad. La investigadora Yolanda Sanz, del Instituto de Agroquímica y Tecnología de los Alimentos (IATA-CSIC) en Valencia, trabaja desde hace años en ambas patologías. Su grupo patentó la bacteria probiótica *Bifidobaterium longum ES-1*. "Esta bacteria, junto con una dieta sin gluten, reduce la inflamación y se restablecen las alteraciones del ecosistema intestinal", explica Sanz. "Actualmente estamos investigando si en pacientes celiacos recién diagnosticados, que ya llevan un año con dieta sin gluten y siguen teniendo sintomatología intestinal, la microbiota tiene alguna relación", explica. En cuanto a la obesidad, Sanz y su grupo han identificado el papel antiinflamatorio

La comunicación entre bacterias

Las bacterias tienen su propio sistema de comunicación, que permite que organismos tan pequeños sean capaces de actividades tan variadas, como por ejemplo producir una enfermedad en el ser humano. Este lenguaje, denominado *quorum sensing,* fue descubierto por Peter Greenberg y Bonnie L. Bassler, galardonados este año junto a Jeffrey Gordon con el Premio Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica por la importancia de sus investigaciones en el conocimiento de la microbiota y la comunicación bacteriana.

Bonnie L. Bassler

"Lo que hemos descubierto a lo largo de estos años es que, al menos en las bacterias modelo con las que trabajamos, hay una molécula que produce solo esa especie y les indica que las que están a su alrededor son sus hermanas, sus gemelas. Pero también hay moléculas que pueden producir un género entero de bacterias, como los vibrios. Esta molécula les dice: vale, tú eres mi prima. Y por último, hay un tercer tipo de molécula que se produce ampliamente en el mundo bacteriano. Es una molécula universal y simplemente dice: eres un tipo de enemigo", explica la doctora Bassler. A través de este sistema de comunicación



Mecanismo de *Quorum Sensing*.

las bacterias saben cuándo han de realizar una determinada función, como puede ser la capacidad patogénica. "Cuando aumenta la densidad celular aumenta la concentración del autoinductor y así es como las bacterias comienzan a actuar en grupo, casi como un organismo pluricelular", añade.

El grupo de Bassler también ha demostrado que los virus capaces de infectar bacterias pueden detectar este mecanismo de comunicación y saber así cuando es el momento para infectar la célula. "Es indispensable porque si el virus quiere matar a su célula hospedadora para infectar otra tiene que estar seguro de que esa otra célula está ahí", explica. Igualmente han demostrado que las células intestinales humanas también imitan los autoinductores bacterianos existiendo, por tanto, una comunicación entre virus, bacterias y células eucariotas. Un idioma entre reinos.

Actualmente tratan de evaluar cómo se comportan estos microorganismos no solo de forma aislada sino como conglomerados de varias especies bacterianas o de virus y bacterias y en ambientes más cambiantes. "Queremos que se aproxime más a la forma en la que viven estos microorganismos realmente. De esta manera seguramente encontremos nuevos autoinductores y nuevas moléculas implicadas en estos lenguajes de comunicación". ◗

de determinadas bacterias. "Actúan desde el intestino, pero este efecto se traduce a tejidos metabólicamente activos, como el hígado o el tejido adiposo", explica la investigadora. "Otras bacterias actuan sobre el sistema enteroendocrino y estimulan la producción de las hormonas que reducen el apetito o que regulan los niveles de glucosa o mejoran la señalización de la hormona GLP1, en el caso de la diabetes".

Eje cerebro-intestino

Nuestro cerebro y nuestro intestino están comunicados de manera bidireccional, lo que se conoce como eje intestino-cerebro. Esta conexión tiene lugar a través del nervio vago, que comunica físicamente los dos órganos, pero también mediante la liberación de hormonas, neurotransmirores y otras moléculas. En los últimos años, los científicos intentan esclarecer el papel de la microbiota en esta conexión y cómo los microorganismos pueden influir en patologías como la ansiedad o la depresión o el alzheimer, entre otros. "En nuestros estudios hemos visto diferencias en la composición del microbioma entre personas sanas y personas con ansiedad o depresión. En un estudio que realizamos con más de mil muestras vimos diferencias en cuanto a la composición a nivel de especies bacterianas con potencial neuroactivo y en personas con depresión observamos menor abundancia de bacterias con potencial antiinflamatorio, como las que son capaces de producir butirato", dice Mireia Vallés, investigadora del grupo de metagenómica computacional del CIBIO, en la Universidad de Trento (Italia).

Yolanda Sanz, también investiga sobre la influencia del estrés en la microbiota intestinal y en cómo la comunicación intestino-cerebro puede verse afectada como consecuencia. Trabajando con ratones y simulando una situación como es el *bullying* en adolescentes han identificado una bacteria intestinal capaz de reducir la respuesta del eje hipotalámico-pituitario-adrenal (HPA), nuestro mediador en la respuesta al estrés, que actúa movilizando nuestras reservas de energía y poniendo en marcha nuestro sistema inmunitario.

Yolanda Sanz.

"Cuando estamos frente a un estrés que se prolonga en el tiempo, esta respuesta acaba por tener un efecto adverso porque el organismo no es capaz de volver a su situación basal y se llega a un proceso inflamatorio crónico. *Christensenella minuta* consigue reducir la sobreproducción de corticoides en el estrés crónico y también regula los niveles de neurotransmisores, como serotonina o dopamina, que en situaciones de estrés se reducen", explica la investigadora. También trabajan con una bifidobacteria que "en una etapa muy temprana de la exposición al estrés, induce una respuesta antiinflamatoria y reguladora, pudiendo tener un efecto preventivo y de regulación del proceso inflamatorio", añade. La patente de *Christensenella minuta* ha sido licenciada a LNC Therapeutics, empresa biotecnológica que será la que lleve a cabo los ensayos en humanos para comprobar su eficacia en pacientes.

Más allá del intestino

Aunque el mayor porcentaje de nuestra microbiota se encuentra en el tracto digestivo, existen otros tejidos y órganos donde los microorganismos juegan un papel importante. La cavidad oral es uno de ellos. El grupo de Toni Gabaldón ha estudiado la diversidad de la microbiota oral en individuos sanos, a través de un proyecto de ciencia ciudadana, en el que observaron la existencia de dos estomatotipos diferentes, es decir, dos tipos diferentes de composición de la microbiota que, estando en equilibrio, difiere entre individuos. Estos estomatotipos se identificaron también en muestras procedentes de Japón, lo que indica que podría ser algo extendido a nivel global. "Son dos patrones diferentes en personas sanas. Pensamos que a lo largo de la vida se pueda incluso pasar de un estomatotipo a otro, según determinadas condiciones, aunque no hemos encontrado una correlación clara entre los estomatotipos y el origen geográfico o los hábitos de vida", aclara el investigador.

Actualmente su grupo trabaja en proyectos más específicos, con pacientes con enfermedades como fibrosis quística o personas con síndrome de Down. "Para ellos es importante la relación que puede

Enterobacteriaceae

Bacillus anthracis

Bacilus tuberculosis

Klebsiella pneumoniae

tener, por ejemplo, la saliva como un reservorio de patógenos que luego pueden afectar a los pulmones", explica Gabaldón. Otro ejemplo es el microbioma pulmonar. En este caso, "en un pulmón sano lo normal es que existan pocas bacterias. No obstante, es difícil analizar pulmones sanos, ya que se necesita un lavado bronquialveolar, que es una técnica muy invasiva. Se sabe por otros modelos animales o aproximaciones, como frotis orofaríngeos, que son comunidades mucho menos abundantes mientras que, en un estado patológico, como infección por COVID-19, gripe o pacientes que tienen que estar con respiración asistida, el microbioma se enriquece", aclara.

Pese a que un gran porcentaje de nuestra microbiota está compuesta de bacterias, existen otros microorganismos de los que se conoce menos su función. El grupo de Toni Gabaldón trabaja asimismo en esclarecer el papel de los hongos en estas comunidades. "Son menos numerosos, pero pensamos que no por ello menos importantes", relata. Desarrollan metodologías de análisis de datos genómicos que permitan identificar mejor las especies de hongos existentes en las muestras. "La presencia de ciertos hongos puede regular la población bacteriana, mediante la secreción de determinadas moléculas y estableciendo relaciones positivas o negativas, por lo que pueden tener un papel en el establecimiento del equilibrio de la microbiota", detalla.

Cómo ganamos nuestras bacterias

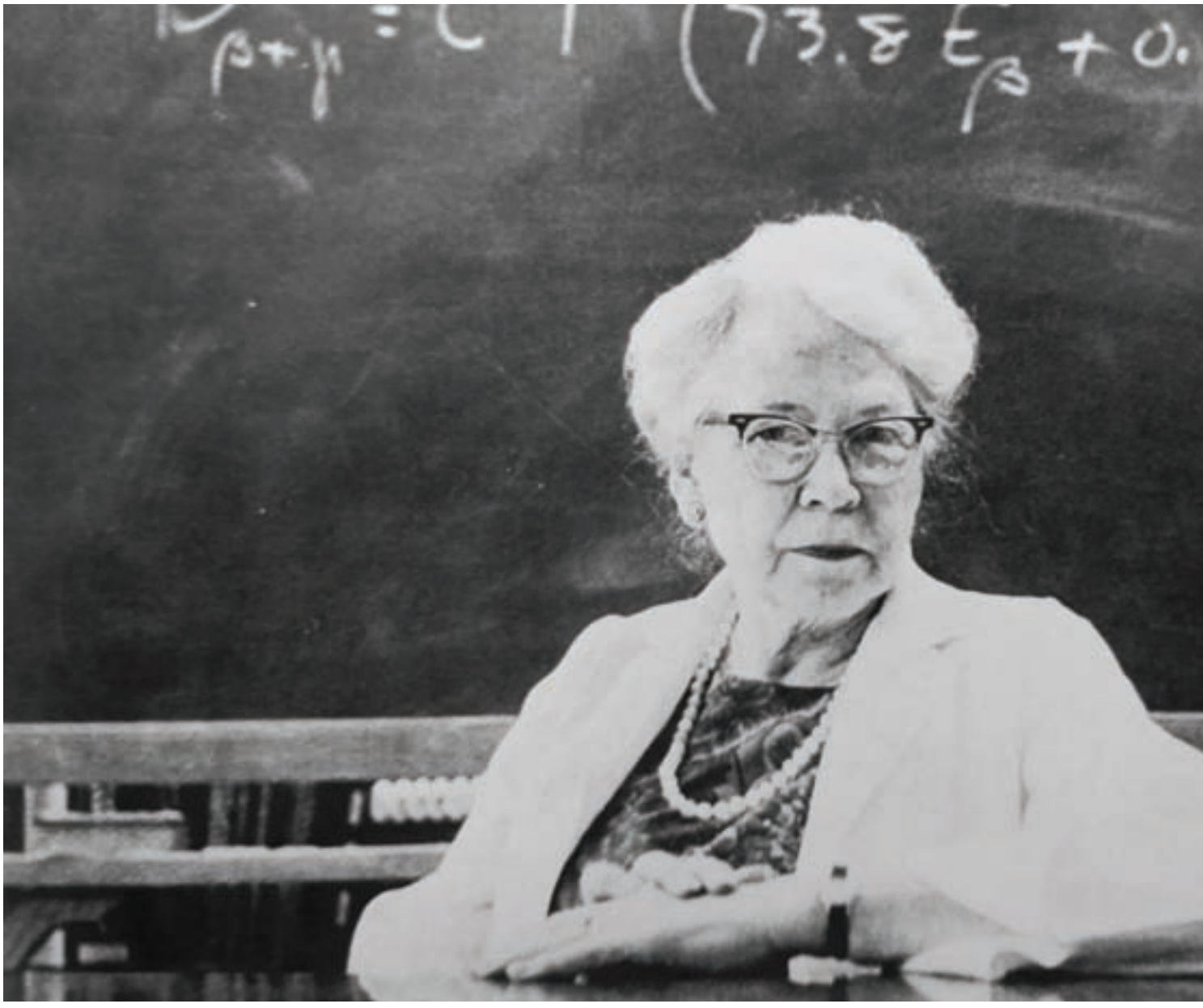
Nuestro microbioma cambia a lo largo de los años y su composición depende de diversos factores, como puede ser la dieta, los hábitos de vida o los tratamientos farmacológicos. Una de las formas más conocidas de obtener estos microorganismos es a través de nuestra madre, en lo que se conoce como transmisión vertical. A través del análisis de unas 10 000 muestras de individuos de 20 países de todo el mundo se ha detectado que los patrones de transmisión son muy similares en todos los continentes. "La colonización que se produce en el nacimiento es muy importante y permanece más o menos estable durante

Mireia Vallés.

el primer año de vida. Un 50 % de cepas bacterianas son compartidas entre la madre y el bebé. A partir del año, se empiezan a obtener bacterias de otras fuentes que, generalmente son otros individuos ya que la mayor parte de las bacterias intestinales no podrían sobrevivir fuera del cuerpo humano, pero lo más interesante es que hemos encontrado que una parte de esta similitud se mantiene a lo largo de los años", explica Mireia Vallés, autora principal del trabajo. Los resultados también indican una importante diferencia entre el parto natural y el nacimiento por cesárea, hasta el año de vida. "A partir de los 3 años esas diferencias ya no se ven. Pero podría ser que durante ese periodo estas alteraciones en la microbiota pudieran afectar al desarrollo neurológico. Actualmente hay varios estudios que tratan de evaluar los efectos de una transmisión de microbiota materna a bebés nacidos por cesárea", explica la investigadora.

Al mismo tiempo también han identificado lo que denominan transmisión horizontal, es decir, transmisión entre personas de un mismo entorno. Analizando muestras de comunidades de diferentes partes del mundo han observado que "la proporción de transmisión de microbioma es un fenómeno muy universal. La composición de un lugar a otro cambia por el estilo de vida, por la alimentación, pero no cambia el grado de transmisión que hay entre personas que viven en un mismo entorno", afirma Vallés. "Esta transmisión entre personas sanas podría tener implicaciones muy importantes, enfermedades consideradas no contagiosas, que no están relacionadas con un componente infeccioso, podrían convertirse en contagiosas a través del microbioma", añade. Por ello, el siguiente paso es estudiar la transmisión en personas con enfermedad. "Sería interesante ver si una persona enferma se podría beneficiar de la microbiota de las personas sanas de su entorno". Actualmente, los científicos también estudian el microbioma de algunos animales de compañía y si existe también una transmisión y entre ellos y sus dueños, lo que haría que tener una mascota fuese aún más beneficioso para nuestra salud.

Helicobacter pylori *Corynebacterium diphtheriae* *Clostridium botulinum* *Escherichia coli*



Edith Hinkley Quimby y el nacimiento de la radioterapia

Edith Hinkley Quimby fue una de las pioneras en el campo de la física médica; concretamente, en el uso de las radiaciones ionizantes para aplicaciones médicas. Sus investigaciones, que comenzaron poco después de iniciarse la Primera Guerra Mundial, giraron principalmente en torno a la medición y el cálculo preciso de las dosis de radiación y la dosimetría, lo que sentó las bases físicas de la radioterapia moderna y la seguridad radiológica. En una época y un campo sin apenas mujeres científicas, la dedicación de Quimby a su trabajo la impulsaron a convertirse en una de las figuras más influyentes en el campo de la física médica mundial.

■ Texto: **Eugenia Angulo** | periodista de ciencia ■

Rockford, Illinois, su ciudad natal.

"Mi vida ha sido feliz e interesante. El comienzo de mi actividad profesional me situó en un campo que entonces estaba lleno de problemas fascinantes y que el tiempo ha hecho aún más interesantes. Siempre he tenido buena salud y la capacidad de trabajar a un ritmo bastante alto y de mantener varias pelotas en el aire a la vez. Pero todo el éxito que he logrado se lo debo en gran parte a la ayuda y el estímulo de los demás. En primer lugar, estoy profundamente en deuda con el Dr. Gioacchino Failla, que me inició en este campo y que siempre estuvo disponible para hacer comentarios, criticarme y ayudarme. Luego, con todos mis colaboradores, tanto en los aspectos físicos como clínicos de casi todo lo que hice, tengo una tremenda deuda; no podría haber realizado ni una décima parte de mi trabajo sin ellos. Y detrás de todo lo demás estaba un marido comprensivo y alentador, siempre orgulloso de cualquier logro y dispuesto a ayudar a promover la siguiente actividad. Sin duda, puedo contarme entre las personas afortunadas".

La afortunada vida de Edith Hinkley comenzó el 10 de julio de 1891 en Rockford, la llamada "ciudad del bosque", en el estado de Illinois, Estados Unidos. Desde muy pequeña, Hinkley demostró un gran interés por la ciencia y en particular por la física y las matemáticas y en 1912 se licenció en ambas materias en el Whitman College de Washington. Tras un breve periodo como profesora de secundaria en un instituto en Nyssa, Oregón, en 1914 obtuvo una beca para continuar sus estudios de física en la Universidad de California en Berkeley, donde obtuvo un máster. Aquí conoció a un compañero de estudios, Shirley Leon Quimby, con quien se casó en 1915. Dos años después, Estados Unidos entró en la Primera Guerra Mundial y Shirley fue destinado a servir en la marina.

Al acabar la guerra, el matrimonio se desplazó a Nueva York y Hinkley, ya

Gioacchino Failla,

Edith Hinkley Quimby, buscó un puesto para aumentar los ingresos familiares mientras Shirley hacía el doctorado en física del estado sólido en la Universidad de Columbia. En 1919 empezó a trabajar en un laboratorio recién montado en el Memorial Hospital for Cancer and Allied Diseases de Nueva York, el actual Memorial Sloan Kettering Cancer Centre, para investigar las aplicaciones médicas de la radiación. Este no era el primer equipo de física médica de Estados Unidos, pero probablemente sí era el primero

EMINENT EDUCATIONAL INSTITUTE

El Whitman College de Washington, donde Edith Hinkley se licenció en Matemáticas y Física.

en centrar su atención en los efectos biológicos de la radiación, de ahí su nombre: Laboratorio de Biofísica. Lo dirigía un físico estadounidense de origen italiano, Gioacchino Failla, que poco antes había sido contratado para operar la planta de radón del hospital. Como curiosidad, Failla conoció a Marie Curie en París, poco después de que terminara la guerra, y le animó a doctorarse en la Universidad de París. De hecho, fue presidenta del comité que revisó su tesis.

Aunque los rayos X habían sido descubiertos más de 20 años antes y el uso del radio para tratar el cáncer estaba ya bastante extendido, "sus aplicaciones en medicina, y especialmente a la radioterapia, estaban en un estado muy primitivo", según escribió Harald H. Rossi, catedrático emérito de oncología radioterápica y director del Laboratorio de Investigación Radiológica de la Universidad de Columbia de 1960 a 1984, en el obituario sobre Quimby que escribió para la revista Physics Today. Pero queda mucho para ese momento.

En estos primeros años 20 del siglo pasado la biofísica de la radiación con

Hospital for Cancer and Allied Diseases de Nueva York, actual Memorial Sloan Kettering Cancer Centre.

fines terapéuticos era un campo que empezaba a nacer, completamente novedoso y también difícil de definir, y Quimby estaba deslumbrada. Como escribió en un homenaje a Failla: "La primera observación de un cambio en la piel irradiada fue el inicio de la biofísica de la radiación, aunque pasaron muchos años antes de que este tema se convirtiera en una parte respetable del estudio de los fenómenos naturales. Una definición satisfactoria de biofísica es difícil de formular, pero sin duda tiene que ver con el uso de herramientas físicas para llegar al conocimiento biológico."

En aquel momento uno de los tratamientos de esta inicial radioterapia eran los implantes de radio, unas agujas de unos cinco centímetros de longitud y cuatro milímetros de diámetro, que se introducían directamente en el tumor o cerca de él y se dejaban allí entre siete

El laboratorio de radio del Memorial Hospital hacia 1918.

y diez días, en lo que se llama braquiterapia o radioterapia interna (braqui, término que procede del griego y significa cercano). Como puede imaginarse, todo este proceso con las agujas era muy doloroso e incómodo para los pacientes y comenzaron a buscarse otros métodos. Uno de ellos fueron las semillas de radón: el radio, al descomponerse, desprende radón, un gas radiactivo que quedaba atrapado en un tubo fino de cristal cerrado herméticamente. A medida que el radón experimenta su propio decaimiento radiactivo emite radiación y va transformándose en otros elementos también radiactivos, la llamada progenie del radón, y esa radiación era la que actuaba sobre los tumores.

Las semillas de radón tenían solo unos pocos milímetros de longitud y una vida media de unos cuatro días, por lo que eran más cómodas que las agujas de radio, pero había que fabricarlas para cada paciente y no podían reutilizarse. Fabricar semillas de radón era el trabajo inicial de Failla en el Memorial, pero éste quería comprender tanto la física como la biología de la radiación y desde que fue contratado, en 1915 y hasta 1942, también desarrolló su departamento de física médica y biofísica. En 1919 Failla contrató a Quimby, una mujer, como ayudante de física, algo sin duda poco habitual en la época. Esto marcó el comienzo de una prolífica colaboración entre ambos, dedicada a desentrañar los misterios de la radiación y sus aplicaciones en medicina, que duraría más de cuarenta años. En 1932, Quimby pasó de ocupar el cargo de física adjunta al de física asociada.

Durante sus 27 años compartidos en el Memorial, Failla y Quimby trabajaron conjuntamente en problemas de dosimetría de rayos X y de radio, protección contra la radiación, eficacia biológica relativa de varios tipos de radiación y métodos para mejorar los procedimientos en radioterapia. Era un terreno prácticamente virgen: los instrumentos eran entonces poco adecuados y los ordenadores aún desconocidos así que se necesitaban avances técnicos para que el funcionamiento de las fuentes de radiación fuera reproducible, fiable y seguro; había que definir con precisión las propiedades físicas de los distintos tipos de radiación ionizante así como las unidades de medida para poder cuantificarlas e incluso inventar instrumentos para realizar estas mediciones. La complejidad de los cálculos en dosimetría era muy grande.

Quimby midió la generación y penetración de diversas formas de radiación en los tejidos para hacer posibles dosis exactas de radioterapia y desarrolló algunos de los primeros métodos para calcular las dosis de radiación biológicamente efectivas, métodos que se estandarizarían tras la Segunda Guerra Mundial.

Uno de ellos fue un sistema de reglas para los implantes de radio, que se utilizó ampliamente en Estados Unidos y que llegó a conocerse como "Reglas Quimby". Publicado bajo el título "The Specification of Dosage in Radium Therapy" en la revista American Journal of Roentgenology, este sistema de dosimetría definía una serie de reglas para la colocación de las agujas y para determinar la distribución de la cantidad de radiación que recibía el tejido, en función de la posición de éstas, y minimizar así los efectos biológicos sobre los órganos y tejidos sanos.

También contaba con nomogramas; es decir, modelos matemáticos que muestran relaciones entre variables distintas, para evaluar fácilmente cuánto tiempo debía estar colocado el implante para alcanzar la dosis de radiación requerida. Este trabajo representó un enorme avance para la práctica de la oncología radioterápica. Otro de sus estudios más citados se centró en los efectos de la radiación sobre la piel, especialmente eritemas, un enrojecimiento e inflamación de la piel que ocurre también en algunas enfermedades. Durante la Segunda Guerra Mundial, Quimby y, más activamente, Failla participaron en el proyecto Manhattan en cálculos de dosimetría de neutrones para el desarrollo de la bomba atómica.

En 1942, Failla trasladó todo su grupo de investigación del Memorial al Co-

legio de Médicos y Cirujanos de la Universidad de Columbia y Quimby se fue con él. Para entonces, ésta ya había recibido el título honorífico de doctora en ciencias del Whitman College, su alma mater, y en Columbia obtuvo el cargo de profesora asociada de Física Radiológica. A partir de este momento, Failla se centró en proyectos de investigación en radiobiología, mientras que Quimby se dedicó al estudio de isótopos y de dosimetría de las radiaciones, a la seguridad radiológica y la enseñanza. Aunque ella siguió siendo miembro de su laboratorio, su asociación científica no volvió a ser tan estrecha como antes.

Edith Hinkley Quimby.

En metro a Columbia

A medida que aumentaba la disponibilidad de radioisótopos artificiales, que se estaban creando mediante reacciones nucleares en aceleradores de partículas y reactores, Quimby se interesó por sus mecanismos de acción. En Columbia desarrolló y dirigió un ajetreado laboratorio de radioisótopos, que ofrecía servicios clínicos y también colaboraba con colegas médicos que deseaban iniciar proyectos de investigación con ellos. Sus investigaciones se centraron en el uso de isótopos artificiales, sodio y yodo principalmente, para el tratamiento y diagnóstico de enfermedades, por ejemplo, enfermedades tiroideas y tumores cerebrales, y en la protección radiológica de las personas que manipulan sustancias radiactivas. También desarrolló y enseñó técnicas para la eliminación de los residuos radiactivos que se producen en los hospitales e ideó procedimientos para la limpieza de vertidos radiactivos accidentales.

Quimby consideraba esencial la formación de médicos y personal de hospitales para comprender la física básica de la interacción entre la radiación y la materia, antes de que pudieran dedicarse a la radiología. En este sentido, fue uno de los cuatro autores del clásico *Fundamentos físicos de la radiología,* el primer libro de texto de física para radiólogos, publicado en 1944 con un precio de cinco dólares. Posteriormente, en 1958, publicó junto a los médicos Feitelberg y Silver, del Hospital Mt. Sinai de Nueva York, *Radioactive isotopes in medice and biology* con quienes también desarrolló los primeros cursos y prácticas de laboratorio sobre isótopos radioactivos que se impartieron en Columbia. Otro texto fundamental fue *Safe Handling of Radioactive Isotopes in Medical Practice,* que Quimby publicó en 1960 con el ánimo de crear un protocolo práctico y sencillo en seguridad radiológica para el personal médico y de enfermería de los hospitales.

En 1954 Quimby obtuvo la cátedra de Física Radiológica en Columbia, puesto que ocupó hasta su jubilación oficial, en 1960. Pero, sin ningún interés en retirarse, pasó a ser catedrática emérita y continuó yendo a Columbia en metro desde su casa en Greenwich Village para dar clases durante veinte años más, casi hasta su muerte, en 1982.

La estatura de Quimby en el campo de la radiología y la investigación de la radiación se ilustra por el prestigioso premio que lleva su nombre, el Edith H. Quimby Lifetime Achievement, que otorga la Asociación Americana de Física en Medicina. En 1940, Quimby fue la primera mujer en recibir la Medalla Janeway de la American Radium Society, otorgado por su trabajo en el establecimiento de las propiedades del radio, y llegó a ser tan prominente en esa sociedad que se cambiaron las reglas para permitirle, sin ser médico de formación, convertirse en su presidenta en 1954. En 1941 recibió la Medalla de Oro de la Radiological Society of North America, fue socia de la American Physical Society, del American College of Radiology, y miembro del Advisory Committee for Medical Uses of Isotopes of the Atomic Energy Commission.

Edith Hinkley Quimby murió en su casa de Nueva York el 11 de octubre de 1982 a la edad de 91 años.

Reacción en cadena

NOTICIAS

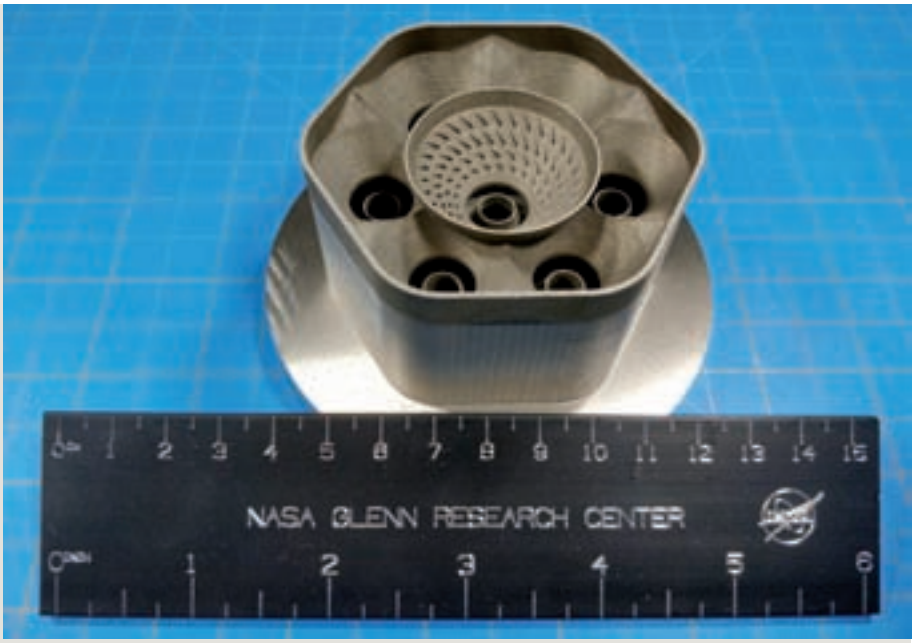
Quejidos vegetales

No podemos escucharlas, pero parece que roedores, murciélagos e insectos sí. Son los sonidos que emiten las plantas cuando están sometidas a situaciones de estrés, según ha descubierto un equipo de investigadores de la Universidad de Tel Aviv, que ha publicado su hallazgo en la revista Cell. Las plantas hacen un ruido similar a explosiones como las

que se producen las semillas de maíz cuando hacemos palomitas, aunque a frecuencias muy altas, por encima de la capacidad auditiva del oído humano. "Las plantas producen vibraciones que se convierten en ondas de sonido y pueden ser registradas a distancia", explica Lilach Hadany, investigadora principal del estudio. Si pudiéramos escucharlas, explica Hadany, descubriríamos que hay un ruido constante procedente de las plantas. Además, han comprobado que la emisión de sonidos se intensifica debido a la escasez de agua o a lesiones. Por ello, los investigadores han solicitado una patente para aprovechar este fenómeno para modular el riego de la agricultura y reducir el consumo de agua de regadío atendiendo las necesidades estrictas de las plantas.

GRX-810, el supermaterial de la NASA

Las extremas condiciones que se producen en el espacio exterior exigen materiales capaces de soportarlas. Para mejorar los existentes, el Centro de Investigación Glenn, que la agencia espacial estadounidense tiene en Cleveland, investiga en nuevas aleaciones y hace poco dio a conocer el supermaterial que ha desarrollado, cuyas cualidades califica de revolucionarias. GRX-810, que es el nombre que le han asignado, es capaz de soportar temperaturas de más de 1.090 grados Celsius, ofrece una gran resistencia a la fricción y el estrés (hasta 600 veces más resistente que cualquier otra aleación conocida, según sus creadores) y es flexible y maleable: se puede doblar y estirar más de tres veces sin romperse. Por si fuera poco, aseguran que es un material mil veces más duradero que los empleados actualmente



en los satélites y sondas espaciales. Los ingenieros que lo han desarrollado consideran que sería un material idóneo para construir la estructura de motores y cohetes. Para fabricarlo, los investigadores han utilizado un material compuesto por níquel, cobalto y cromo, reforzado con partículas de óxido de itrio dispersadas regularmente, para lo cual han empleado una impresora 3D. Previamente, desarrollaron modelos computacionales para determinar la estructura que debía tener y simular su comportamiento y propiedades.

Se confirma que los neutrinos tienen masa

Desde que, en 1930, Wolfgang Pauli propuso la existencia del neutrino, una partícula neutra que explicara la pérdida de energía en la desintegración beta, y su detección, en 1956, se suponía que carecía de masa. Posteriormente se supo que había tres tipos de neutrinos. Durante los años 70 y 80, las mediciones de los neutrinos procedentes del Sol parecían indicar que llegaban a la Tierra menos de los esperados y para explicar este déficit se planteó la hipótesis de que estas partículas podían oscilar; es decir, podían convertirse de una variedad a otra. En 1998, el detector de neutrinos japonés Super-Kamiokande comprobó que, efectivamente, el neutrino oscilaba y ello implicaba que tenía masa, aunque fuera ínfima. El hallazgo se dio a conocer ese mismo año en la conferencia 0-Mass neutrino. El descubrimiento alentó la idea de que quizás los neutrinos podían explicar la misteriosa materia oscura, aunque mediciones posteriores lo descartaron por insuficiente. La medición exacta de la masa de los neutrinos sigue siendo motivo de investigación.

Bebemos plastificantes

Las bebidas azucaradas tienen 100 veces más concentración de plastificantes organofosforados que el agua, según un estudio, publicado en la revista *Environment International,* realizado por investigadores del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del CSIC, que analizó 75 muestras de diferentes bebidas: agua, refrescos tipo cola, zumos, vino y bebidas calientes. Los nanocontaminantes provienen tanto de los envases como del propio azúcar añadido a estas bebidas. Los plastificantes son un tipo de compuestos químicos que se añaden a los plásticos para dotarles de la flexibilidad y la durabilidad deseadas. Los estudios más recientes han demostrado la toxicidad de varios de los plastificantes organofosforados, incluyendo daños neurológicos, disrupción endocrina, cáncer y problemas de fertilidad. "Nuestros resultados muestran que más del 95 % de las bebidas tienen, al menos, uno de los 19 plastificantes organofosforados que estudiamos, lo que muestra la ubicuidad de estos compuestos y nuestra exposición a ellos en nuestro día a día", dice Julio Fernández Arribas, primer autor del estudio. Los mayores niveles de contaminación se han detectado en los refrescos azucarados tipo cola, con una concentración media de 2 876 nanogramos por litro (ng/L), y para los zumos con azúcares añadidos (2 965 ng/L), mientras que los niveles inferiores se han hallado en las muestras de agua (20,7 ng/L).

EN RED

Navegando por la tabla periódica

Internet ofrece numerosas tablas periódicas de los elementos químicos, muchas de ellas, además, de formato interactivo. La que ofrece Ptable es probablemente la más completa. Para empezar, permite elegir el idioma entre 48 opciones diferentes. También ofrece cuatro apartados de información: Propiedades, Electrones, Isótopos y Compuestos. En el primero basta colocar el cursor encima de una casilla para obtener información de 14 características físico-químicas (entre ellas, peso atómico, niveles de energía, electronegatividad, puntos de fusión y ebullición, afinidad electrónica, energía de ionización, radio, dureza, densidad, conductividad térmica y abundancia en el universo), además del año de su descubrimiento y un enlace a Wikipedia para ampliar información. En la segunda pestaña se puede conocer la configuración electrónica del elemento. En la de Isótopos se pueden desplegar todos los conocidos de cada elemento y conocer sus propiedades pinchando en cada uno de ellos, incluido el tipo de desintegración si no es estable y su periodo de semivida, entre otros datos. El último apartado permite juntar diferentes elementos ver todos los compuestos que se pueden formar con ellos, su nombre, su fórmula y, mediante un enlace, acceder a más información.

https://ptable.com/

Todo acerca de los premios Nobel

Alfred Nobel, inventor y empresario sueco de éxito, falleció en 1896 y en su testamento decidió legar su fortuna para la creación del premio que lleva su nombre y que es, con diferencia, el más prestigioso del mundo. La web que acoge a la Fundación Nobel, la encargada de cumplir los deseos del inventor, ofrece detallada información sobre la vida de Nobel; el complejo proceso de elección de los premiados; las actividades que se organizan en torno a la entrega, que se realiza el 10 de diciembre de cada año por ser el aniversario del fallecimiento de su creador; la historia del premio; los atributos de los galardonados (medalla, diploma y premio en metálico) y otras curiosidades; además de las biografías de todos los premiados desde el año 1901 en que se celebró por primera vez su entrega. Las biografías son muy completas, normalmente escritas por los propios premiados, y con frecuencia de acompañan de grabaciones de sus discursos o entrevistas con ellos. Además, ofrece cada año la primicia de los premiados, sus merecimientos y sus trayectorias.

https://www.nobelprize.org/

REDES

@iterorganization

El canal de YouTube del reactor internacional ITER acumula 265 vídeos, algunos de carácter divulgativo sobre a la fusión y otros sobre el proceso de construcción.

Instituto de Física Corpuscular

En su página de Facebook, el IFIC, centro mixto CSIC-Universidad de Valencia, difunde y comenta las noticias del mundo de la física nuclear, de partículas y de astropartículas.

@xataca

Xataca es la publicación digital de tecnología en español más visitada (millón y medio de seguidores en X, antes Twitter). Permite acceder a noticias, reportajes y análisis de productos.

@archdaily

La cuenta de Instagram dedicada a la arquitectura con mayor número de seguidores en todo el mundo (3,5 millones) permite asomarse a los edificios e interiores más sugerentes. Sus fondos incluyen casi 5.000 imágenes

Museo de la evolución humana

Burgos alberga un museo científico dedicado a la evolución humana. Su cuenta de TikTok ofrece numerosos videos dedicados a contar la historia de la evolución biológica que dio lugar a nuestra especie y de sus protagonistas.

AGENDA

Bocados
La nutrición y los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Domus – Museos Científicos Coruñeses
Rúa Ángel Rebollo, 91, 15002 A Coruña.
Horario: De lunes a domingo, de 10.00 a 20.00 h

A Coruña alberga el mayor complejo de centros interactivos de ciencia de España: la Casa de las Ciencias, Domus, Aquarium finisterrae y el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología. Domus es un centro peculiar, ya que está específicamente dedicado al ser humano en todas sus dimensiones, desde los aspectos biológicos hasta los culturales y sociales. Es uno de los emblemas de la ciudad, por su singular edificio, diseñado por el célebre arquitecto japonés Arata Isozaki, y también por sus imaginativos contenidos. Entre ellos, con carácter semi-permanente, se encuentra esta exposición, que enlaza aspectos relacionados con la nutrición con los temas que forman parte de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas, la llamada Agenda 2030, como asegurar el acceso al agua, conseguir la erradicación del hambre o alcanzar la igualdad de género. La exposición permite, entre otras cosas, realizar un ejercicio y comprobar las calorías consumidas, subirse a una báscula que te indica la cantidad de agua que almacenas en tu cuerpo, aprender técnicas culinarias para comer más sano, escuchar los ruidos de la digestión (especialmente los que provocan las legumbres) y jugar en una pantalla táctil para descubrir la otra cara de la alimentación: el placer.

LIBRO

Informando de ciencia con ciencia
Varios autores
Penguin Ramdom House Grupo Editorial, 2023.

Comunicar la ciencia se ha convertido en (casi) una obligación para los protagonistas de la investigación. Se trata de que la sociedad acceda al conocimiento de lo que los científicos hacen e incluso que participe en algunas decisiones de política científica; por un lado, porque es una justa rendición de cuentas a quienes financian su trabajo y, en segundo lugar, porque el propio futuro de la investigación necesita del apoyo de la sociedad. Este libro, un auténtico manual práctico, pretende ayudar a quienes se ponen a la tarea y lo hace de la mano de casi una treintena de profesionales de la comunicación científica, que explican de forma pormenorizada cómo realizan su trabajo, analizan el uso de las herramientas disponibles para realizar una comunicación efectiva y responden a las dudas que previsiblemente acechan a los científicos que deciden participar de manera activa en la apasionante tarea de contar la ciencia y acercarla a la ciudadanía. Además, aborda cuestiones no siempre contempladas en este tipo de manuales, como la manera adecuada de trasladar al público las incertidumbres inherentes a la actividad científica o cómo abordar la comunicación en situaciones de crisis. En su edición han colaborado la

Fundación Lilly, la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, la Asociación Española de Comunicación Científica y The Conversation.

Panorama

El CSN firma un convenio con la Sociedad Española de Protección Radiológica

El pasado 3 de julio el presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Juan Carlos Lentijo, y la presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), María Antonia López, firmaron un convenio de colaboración para difundir el conocimiento de la protección radiológica mediante la actualización y modificación de publicaciones divulgativas o las guías docentes del CSN relativas al desarrollo de la protección radiológica en diferentes disciplinas profesionales.

Asistieron al acto por parte del CSN los consejeros Javier Dies, Francisco Castejón y Elvira Romera; y el director técnico de Protección Radiológica, Javier Zarzuela. Por parte de la SEPR se encontraba su vicepresidente, Fernando Sierra; la secretaría de la organización, Rocío Escudero, y su expresidenta, María Teresa Macías, quien desempeñó un papel fundamental en la elaboración del documento.

Ambas instituciones mantienen una estrecha relación en el ámbito sanitario, en el sector de la radiografía industrial y con las unidades técnicas de protección radiológica de los trabajadores y pacientes. Además, organizan jornadas y seminarios técnicos en el ámbito de la protección radiológica y mantienen una intensa colaboración en grupos de trabajo para normativa internacional -como las publicaciones de la ICRP- y en la trasposición de las directivas europeas de este ámbito.

Reunión del comité de enlace entre el CSN y Enusa

El 7 de julio se celebró en el CSN la reunión del comité de enlace entre el regulador y Enusa Industrias Avanzadas. Entre otros temas se trató la situación de la Planta Quercus de fabricación de concentrados de uranio, en Saelices el Chico (Salamanca), y el plan de restauración del emplazamiento; las actividades de licenciamiento de la fábrica de Juzbado (Salamanca), la fabricación de nuevos productos y la validación de los contenedores para su transporte; así como otras actividades de interés mutuo. En la reunión participaron los consejeros Elvira Romera, quien preside dicho comité, Pilar Lucio, Javier Dies y Francisco Castejón, y los directores técnicos de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, Teresa Vázquez y Javier Zarzuela. Por parte de Enusa estuvo su presidente, Mariano Moreno, acompañado por los responsables de Desarrollo de Negocio, Ingeniería y Negocio Medioambiental, el director técnico de la Fábrica de Juzbado y el del centro de Saelices el Chico.

Curso sobre residuos y desmantelamiento de instalaciones en la UIMP

El CSN participó en el curso "Retos en la gestión de los residuos radiactivos y el desmantelamiento de centrales nucleares", celebrado entre el 12 y el 14 de julio en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo en Santander. Organizado por Enresa y dirigido por Yolanda Benito, directora del Ciemat, el encuentro permitió profundizar en los retos actuales de la gestión de residuos radiactivos y el desmantelamiento de instalaciones y analizar la experiencia española y la de países como Francia, Finlandia y Suiza. Por parte del CSN participó el director técnico de Protección Radiológica, Javier Zarzuela, quien abordó el marco regulador y el papel de las autorizaciones en estas actividades y recordó los altos niveles técnicos de exigencia a los que se somete cualquier proyecto para garantizar la seguridad de los trabajadores, la población y el medio ambiente.

Reunión en Valencia del comité de seguimiento de la Cátedra Vicente Serradell

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), encabezada por la consejera Pilar Lucio, se reunió el 21 de junio con los responsables de la Cátedra de Seguridad Nuclear "Vicente Serradell", en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universitat Politècnica de Valencia. La consejera Lucio destacó la importancia que para el CSN tiene la inversión en investigación y, en esa línea, aseguró que "estas iniciativas hablan del compromiso del Consejo, tanto con la supervisión y gestión como con el estudio y el análisis, lo que redunda en la buena preparación de los profesionales". También recordó que está abierto el plazo de solicitud de subvenciones para proyectos de I+D+i a los que se destina un millón y medio de euros. El titular de la cátedra, Gumersindo Verdú, expuso las actividades y proyectos relacionados con la seguridad nuclear y la protección radiológica a realizar en 2023, así como la concesión de becas de doctorado y de colaboración en su ámbito de estudio. Entre los objetivos de las reuniones del comité de seguimiento también está la verificación del cumplimiento de las condiciones por las cuales se conceden las ayudas acordadas, analizar las actividades de la cátedra o elaborar propuestas de mejora.

Simulacro de emergencia en la central nuclear Cofrentes

El pasado 22 de junio se llevó a cabo el preceptivo simulacro anual de emergencia de la central nuclear Cofrentes (Valencia), con la participación de la Organización de Respuesta ante Emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). La actuación del regulador se realizó tanto desde la Sala de Emergencias de respaldo (Salem 2), situada en el cuartel general de la Unidad Militar de Emergencias en Torrejón de Ardoz (Madrid), como desde el Centro de Coordinación Operativa (CECOP) de la Delegación del Gobierno en Valencia. Este tipo de ejercicios se lleva a cabo una vez al año para simular la indisponibilidad de la Sala de Emergencias en la sede del CSN, gracias al acuerdo firmado por ambas instituciones en 2010. La situación presuntamente producida habría sido clasificada como nivel 3 en la Escala internacional de sucesos nucleares y radiológicos (INES).

El Consejo informa al Comité Asesor sobre el desmantelamiento de Garoña

El Comité Asesor para la Información y Participación Pública del CSN mantuvo el 29 de junio una reunión a la que asistieron todos los miembros del Pleno y los directores técnicos del CSN. En el encuentro se informó sobre el licenciamiento de la primera fase del desmantelamiento de Santa María de Garoña. En mayo, el Consejo informó favorablemente, con límites y condiciones, las solicitudes de cambio de titularidad de Nuclenor a Enresa y la primera fase del desmantelamiento. También se comunicó la puesta en marcha del nuevo canal de denuncias que se reciben en el Consejo, dando cumplimiento a la Ley 2/2023, y se presentaron las actuaciones realizadas en respuesta a las recomendaciones realizadas por el Comité, como la celebración de una Jornada internacional sobre el AGP y sobre la información disponible acerca del almacén de residuos radiactivos de El Cabril. También se propuso realizar una evaluación externa para conocer las fortalezas y oportunidades de mejora en el funcionamiento del Comité.

IFMIF-DONES presenta al CSN su estrategia de licenciamiento

El Consejo de Seguridad Nuclear recibió el 14 de julio a los representantes del proyecto de la Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión y Fuente de Neutrones orientada a Demostración (IFMIF-DONES), que presentaron al regulador la estrategia para su puesta en marcha, que prevé el inicio de los trámites de licenciamiento en junio de 2026. Para su gestión directa se ha creado un Comité de Gestión Internacional, con representantes de todos los socios: el consorcio español, la representación croata y la Comisión Europea. Se espera la incorporación de otros países, como Alemania, Francia e Italia, que, de momento, solo asisten como observadores.

Los participantes revisaron los avances alcanzados en el grupo de trabajo permanente con participación del CSN, el consorcio, el Ciemat y la Universidad de Granada. Su trabajo es clave para definir la estrategia de licenciamiento de esta instalación radiactiva de la que no existe ningún precedente en el mundo. Presidió la reunión el consejero Francisco Castejón y contó con la presencia de la consejera Elvira Romera como vicepresidenta y la participación de los consejeros Javier Dies y Pilar Lucio, además de la directora técnica de Seguridad Nuclear, Teresa Vázquez. Por parte del consorcio asistieron la directora general del Ciemat, Yolanda Benito; el presidente del consorcio español, Ángel Ibarra; y el jefe de Seguridad del proyecto, Francisco Martín-Fuertes.

Durante el primer semestre de 2023 se recibieron 19 sucesos notificables

Las centrales nucleares españolas notificaron al Consejo de Seguridad Nuclear 19 sucesos durante el primer semestre de 2023, siguiendo los criterios establecidos en la Instrucción IS-10. De todos ellos, 15 fueron considerados como sin significación para la seguridad (INES 0); uno se consideró anomalía (INES 1) y los otros tres quedaron fuera de la escala. Según el tipo de notificación, trece fueron clasificados como de 1 hora, 5 de 24 horas, y uno de 30 días. Las causas principales estuvieron relacionadas con las especificaciones técnicas de funcionamiento (32 %), las actuaciones de sistemas de seguridad (32 %), y la operación de la instalación (26 %). Por centrales, Almaraz (Cáceres) realizó cuatro notificaciones, Ascó (Tarragona) siete, Cofrentes (Valencia) y Trillo (Guadalajara) tres cada una, y Vandellós II (Tarragona) y José Cabrera una cada una.

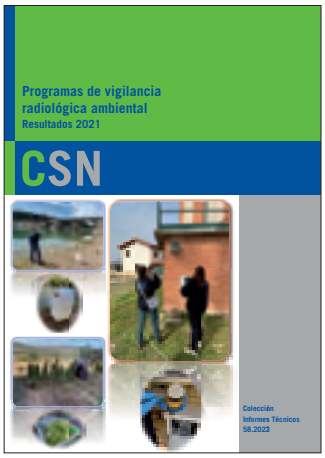
Acuerdos del Pleno del CSN destacados

- El CSN aprueba la contratación del mantenimiento de las 185 estaciones que componen su Red de Estaciones Automáticas (REA)
- El CSN aprecia favorablemente el plan de limpieza y descontaminación presentado por la siderúrgica Megasa
- El regulador da luz verde a la modificación de ocho instalaciones radiactivas pertenecientes al Plan INVEAT.

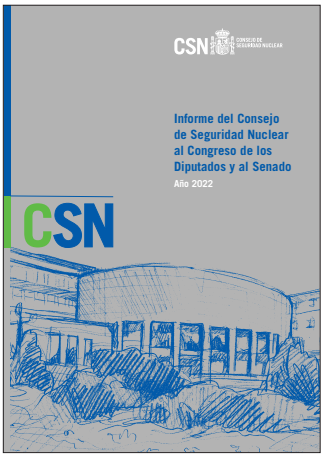
Acceso a todas las actas

Publicaciones

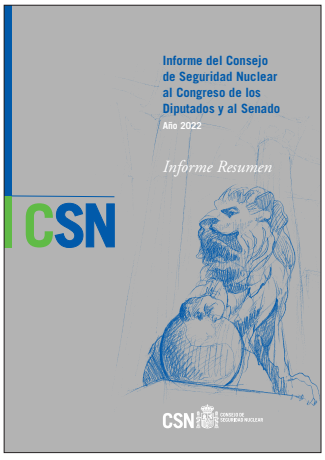
Protección radiológica en el manejo de fallecidos tras un tratamiento reciente con radionucleidos



Programas de vigilancia radiológica ambiental
Resultados 2021



Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado
Año 2022



Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado
Año 2022
Informe Resumen

aLFa Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

Boletín de suscripción

Institución/Empresa

Nombre

Dirección

CP Localidad Provincia

Tel. Fax Correo electrónico

Fecha Firma

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear — Servicio de Publicaciones.** Pedro Justo Dorado Delmans, 11. 28040 Madrid / Fax: 91 346 05 58 / peticiones@csn.es

También puedes suscribirte a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario online: http://run.gob.es/xdjxkd

La información facilitada por usted formará parte de un fichero informático con el objeto de constituir automáticamente el *Fichero de destinatarios de publicaciones institucionales del Consejo de Seguridad Nuclear*. Usted tiene derecho a acceder a sus datos personales, así como a su rectificación, corrección y/o cancelación. La cesión de datos, en su caso, se ajustará a los supuestos previstos en las disposiciones legales y reglamentarias en vigor.

Abstracts

REPORTS

6 Machine learning

The key to the current explosion of artificial intelligence systems lies in having managed to create machines capable of acquiring, and even generating, new knowledge, additional to the information supplied to them previously. This is what has become popularly known as machine learning.

12 The silent enemy

Radon is a colourless, odourless and tasteless radioactive gas that is given off naturally by certain rocks. According to the WHO, it is responsible for between 3% and 15% of lung cancer deaths. Spain is drawing up a National Radon Protection Plan that will complete the transposition of a European Directive dealing with this issue.

32 The battery revolution

Electric vehicles are the leading alternative to those equipped with combustion engines, but achieving the full electrification of the automobile market will require a new generation of batteries. It is expected that by 2027 there will be a solid-state battery providing a range of more than one thousand kilometres and capable of being recharged in less than 15 minutes.

36 The UN committee that studies the effects of ionising radiation

In 1955 the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR) was set up as a result of the concern felt by the international community regarding the potential impact on health of nuclear testing. The Committee is currently made up of experts from 30 countries, among them Spain, and this year has celebrated its 70th meeting.

52 Our inseparable companions in existence

We are made up of some 37 trillion cells, and play host to a similar number of microorganisms, forming what is known as the human microbiota. In recent years scientists have delved into its multiple functions and its importance in maintaining the balance of our organism and or health.

58 Edith Hinkley Quimby and the birth of radiotherapy

Shortly after the start of the First World War, the American physicist Edith Hinkley Quimby became interested in the accurate calculation of radiation doses and their limits, thereby laying down the foundations for modern radiotherapy and radiological safety. Her work made her a pioneer at world level in the field of health physics.

RADIOGRAPHY

24 Radioactive material transport processes

Safety in the transport of radioactive material is based on internationally accepted standards, a clearly defined system of approvals and a framework of supervision and control in which inspection is the most important activity.

INTERVIEW

26 Carlos Hidalgo, director of the National Fusion Laboratory

"When it comes to nuclear fusion, Spain is an example of scientific and technological success".

TECHNICAL ARTICLES

17 Effectiveness of PAR systems in dry containment PWR-W plants

Severe accidents generate large quantities of combustible gases (H_2 and CO) whose uncontrolled combustion might give rise to the off-site release of fission products. Following the Fukushima event, the CSN required the installation of passive autocatalytic recombiners (PARs) in the Spanish plants of US design. This article covers the effectiveness of these systems in a generic three-loop PWR-W plant with a dry containment.

44 Calibration and verification of radiological protection instrumentation for the measurement of radiation and contamination at radioactive facilities

CSN Safety Guide GS-05.17 has been drawn up with a view to facilitating compliance by radioactive facilities with technical specification I.6 of instruction IS-28, establishing recommendations for an adequate calibration and verification procedure and for the selection of suitable radiation monitors depending on the specific characteristics of the radioactive facility.

Trabaja con nosotros

El CSN convoca nuevas plazas para el cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.

Más información en www.csn.es

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR