CSN
alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 57
Marzo 2024

Ciencia y tecnología a escala atómica

Lecciones aprendidas del desarrollo del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria (INVEAT)

William Magwood, director de la NEA/OCDE: "La información pública es una piedra angular de la seguridad nuclear"

Migración a las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas en las centrales nucleares españolas

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

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

La revolución de la nanotecnología

La nanotecnología es la máxima expresión de la tendencia a la miniaturización que ha caracterizado a la electrónica durante las últimas décadas. Un nanómetro es una milmillonésima de metro y es el tamaño de las moléculas, apenas un poco por encima del tamaño de los átomos. En ese mundo minúsculo la materia se comporta se forma diferente a la habitual y, pese a las dificultades de trabajar a esa escala, actualmente la nanotecnología está ya presente en productos de uso cotidiano, como dispositivos electrónicos, cosméticos, tejidos y fármacos, y promete incrementar su presencia en otros muchos. A esta tecnología está dedicado el reportaje de apertura de este número de *Alfa*.

En otro reportaje abordamos el funcionamiento de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, una institución científica independiente, reconocida internacionalmente como la fuente más fiable de información y opinión en el ámbito de la protección radiológica. Creada en 1928, está a cuatro años de ser centenaria y durante su larga historia ha proporcionado recomendaciones y orientación para la adopción de las medidas necesarias para reducir al máximo los riesgos derivados del uso de las radiaciones ionizantes.

Presentamos también las actividades que el CSN realiza en investigación y desarrollo dentro de su ámbito de actuación, a través de su Plan de I+D+i y de su participación en proyectos nacionales e internacionales. El objetivo es mantener siempre la capacidad técnica del Consejo al día. Una de las instituciones con las que el CSN colabora en este ámbito es la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE, cuyo director, William D. Magwood, es el protagonista de la entrevista en este número de la revista.

> *El objetivo de las actividades de investigación y desarrollo del Consejo es mantener siempre al día su capacidad técnica*

En su opinión, la cultura de seguridad y la información pública son dos de las piedras angulares de la seguridad nuclear.

En Ciencia con Nombre Propio recordamos a una de las figuras clave en la investigación de las radiaciones; la de Irene Joliot-Curie, premio Nobel de Química de 1935, junto a su marido, Frèdèrick Joliot, por el descubrimiento de la radiactividad artificial. Su vida estuvo marcada por el ejemplo de sus padres, Pierre y Marie Curie, quienes también recibieron el Nobel de Física en 1903, reconocimiento ampliado por Marie con el de Química en 1911.

Otro reportaje aborda una nueva estrategia contra el cáncer, desarrollada desde hace una década y que cada vez consigue mayores éxitos en los tumores hematológicos. Se trata de la llamada terapia CAR-T, que combina terapia celular, inmunoterapia y terapia génica. En el ámbito medioambiental, tratamos también la situación actual de la Antártida, un continente declarado Reserva Natural para la Paz y la Ciencia, que empieza a estar amenazado por el cambio climático, el turismo y la contaminación.

En los apartados técnicos, un artículo está dedicado al proceso de migración de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas a las centrales nucleares españolas, que culmina en junio de este año. El segundo se enfoca a las lecciones aprendidas por parte del Consejo durante el desarrollo del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria (INVEAT), que ha supuesto un reto para el CSN. la Radiografía aborda las pruebas de fugas del recinto de contención del reactor en centrales nucleares y la sección CSN I+D recoge el proyecto de la Universidad Complutense de Madrid que ha desarrollado un sistema de realidad virtual para mejorara la formación de especialistas en emergencias radiológicas.

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 57
Marzo 2024

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
Verónica Crespo Val
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, Alamy, DepositPhotos, IStock.

Impresión
Villena Artes Gráficas
Av. del Cardenal Herrera Oria, 242, Fuencarral-El Pardo
28035 Madrid

Fotografía de portada
Cuatro imágenes combinadas, de un átomo de titanio. Willke et al.

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

6 Ciencia y tecnología a escala atómica y molecular

Fármacos personalizados y tratamientos dirigidos, instrumentos ópticos, componentes de ordenadores, dispositivos de almacenamiento y baterías, cosméticos, textiles… La nanotecnología está ya presente de forma masiva a nuestro alrededor y promete revolucionar todas las áreas de la ciencia y la industria.

13 ICRP: un siglo orientando la protección radiológica mundial

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es una institución científica independiente, creada en 1928 y reconocida internacionalmente como la fuente más fiable de información y opinión sobre protección contra las radiaciones ionizantes. La forman expertos de 30 países, entre ellos España.

34 Linfocitos armados contra el cáncer

En los últimos años se ha desarrollado con éxito una técnica para el tratamiento de ciertos cánceres hematológicos en numerosos casos de pacientes que no responden a otros tratamientos. Se denomina CAR-T y combina terapia celular, inmunoterapia y terapia génica en un mismo proceso. Ahora se estudia su aplicación también a tumores sólidos.

39 Nubarrones sobre la Antártida

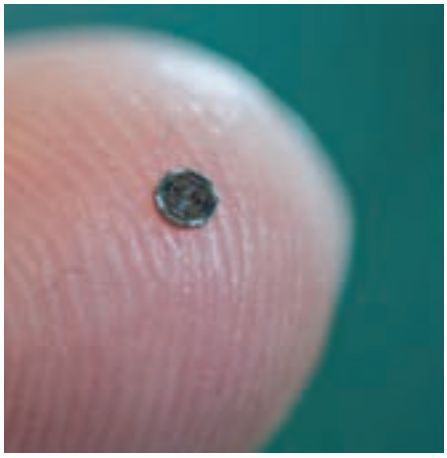
El continente helado, el más seco, frío, ventoso y aislado del mundo; un paraíso declarado Reserva Natural para la Paz y la Ciencia en 1991 en Madrid; está amenazado por factores exógenos, como el cambio climático, la contaminación y el turismo. Pese a su lejanía, juega un papel crucial en el clima mundial por lo que su degradación afectará, como un búmeran, al resto del planeta.

54 Explorando las fronteras de la seguridad nuclear y radiológica

Para llevar a cabo su tarea como organismo regulador, el CSN necesita mantener su capacidad técnica al máximo nivel e incrementarla con las aportaciones que desde la investigación científica y técnica se generan. Para ello, cuenta con un programa de ayudas a proyectos de I+D+i, además de convenios y participación en proyectos nacionales e internacionales.

58 Irene Joliot-Curie y la radiactividad artificial

Pierre y Marie Curie tuvieron dos hijas. La mayor, Irene, nacida en 1897, siguió los caminos abiertos por sus progenitores y junto a su marido, Frédéric Joliot, investigó en el mundo de la radiactividad desde el Instituto del Radio, creado por su madre. Ambos consiguieron producir el primer material radiactivo artificial, por lo que obtuvieron el Nobel de Química en 1935.



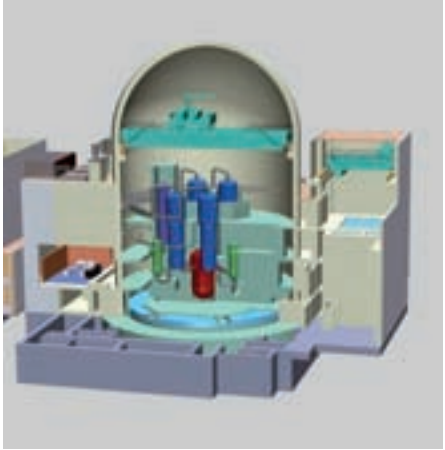
COOLANTARCTICA.COM

OIEA

RADIOGRAFÍA

26 Pruebas de fugas del recinto de contención del reactor en centrales nucleares

Se describen aquí las pruebas periódicas de fugas a las que se somete el recinto de contención del reactor de las centrales nucleares españolas, de acuerdo con la instrucción IS-27 del CSN.



ENTREVISTA

28 William D. Magwood, director general de la Agencia de Energía Nuclear (NEA-OCDE)

"La comunicación pública es una piedra angular de la seguridad nuclear"

JULIO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

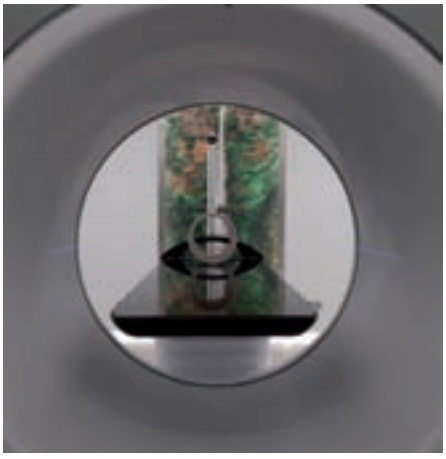
ARTÍCULOS TÉCNICOS

18 Migración a las ETF mejoradas en las centrales nucleares españolas

Las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) son el conjunto de requisitos mínimos que garantizan la operación segura de una central nuclear. En los últimos años se han modernizado con las llamadas ETF mejoradas y en junio de este año culmina la migración al nuevo modelo en las centrales Almaraz, Vandellós II y Ascó.

44 Lecciones aprendidas del desarrollo del Plan INVEAT

Buena parte del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria (INVEAT), dotado con cerca de 800 millones de euros, se ha destinado a la adquisición por centros hospitalarios de equipos que utilizan radiaciones ionizantes. Por ello el CSN ha tenido que emitir los informes previos a su autorización de funcionamiento, lo que ha supuesto un reto para el Consejo y ha permitido extraer lecciones aplicables a futuras actuaciones semejantes.



CSN I+D

52 Realidad virtual para entrenamiento en emergencias radiológicas

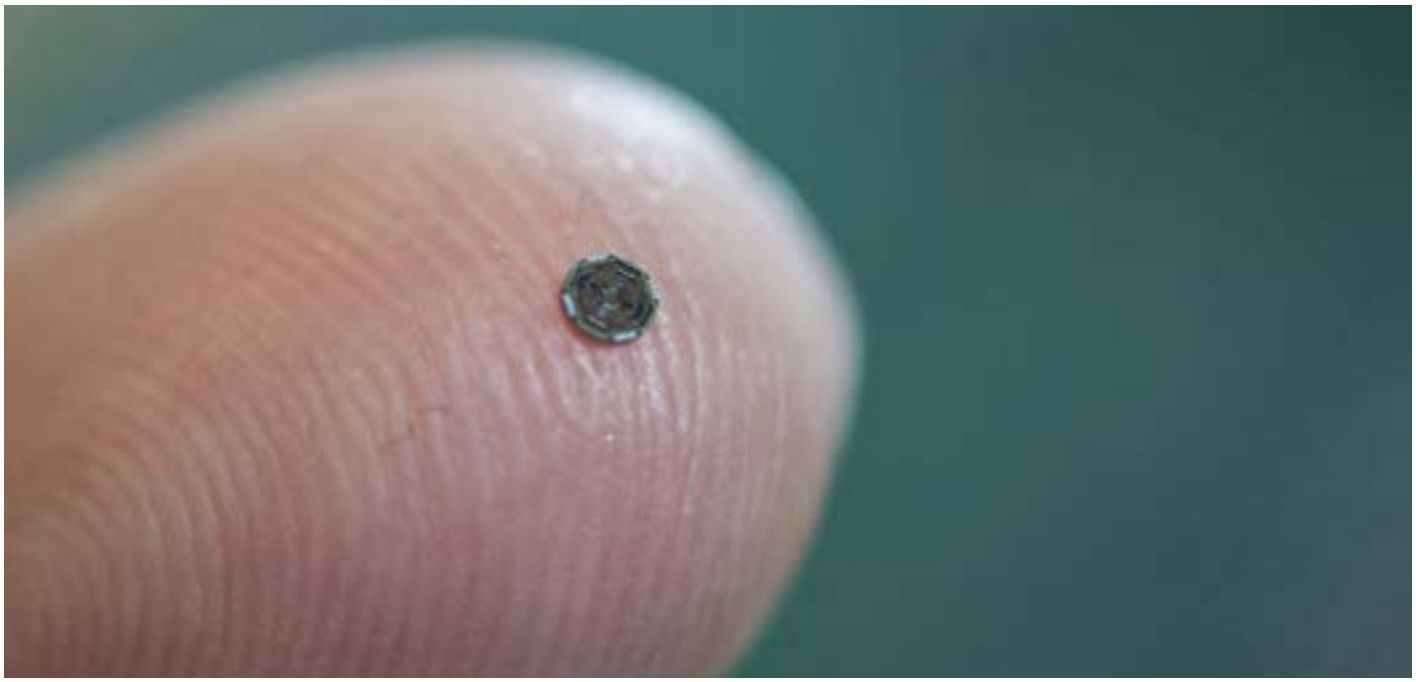
Desde la Facultad de Informática de la Universidad Complutense de Madrid han desarrollado un sistema de realidad virtual para mejorar la formación de especialistas en emergencias radiológicas. Se trata de una alternativa más barata y eficiente, o un complemento a la participación en simulacros.

64 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Publicaciones**

71 **Abstracts**



La nanotecnología se encuentra ya presente en todo tipo de productos de consumo cotidiano

Ciencia y tecnología a escala atómica y molecular

Fármacos personalizados y tratamientos dirigidos, instrumentos ópticos, componentes de ordenadores, dispositivos de almacenamiento y baterías, cosméticos, textiles. Son productos que podemos ver, pero todos ellos llevan incorporadas partículas que no se observan a simple vista y que resultan esenciales para sus aplicaciones. Son los nanomateriales, con propiedades muy diferentes a escala atómica que a su escala convencional. La nanotecnología, el proceso de manipular estos átomos y moléculas, necesita de procesos e instrumentos complejos, pero a cambio promete revoluciones en todas las áreas de la ciencia y la industria, como el tratamiento del cáncer y la edificación sostenible.

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

Entendemos cuánto es un metro, un centímetro y un milímetro. Lo vemos con los ojos, lo abarcamos con los brazos y los dedos. Incluso imaginamos la micra, aunque ya queda oculta a nuestra vista. Un nanómetro es diferente. Este prefijo significa dividir una unidad entre mil millones, es decir, la mil millonésima parte de un metro. Es imposible imaginar eso porque escapa de lejos a la capacidad de nuestra visión; forma parte del mundo atómico (los átomos miden entre 0,1 y 0,4 nanómetros).

Sin embargo, aunque no los veamos, los materiales de esas dimensiones ya forman parte de nuestra vida gracias a la nanociencia, disciplina que surgió hace unos 50 años y estudia los fenómenos físicos a escala nanométrica, y la nanotecnología, que es el diseño, creación y manipulación de estructuras y objetos comprendidos entre 1 y 100 nanómetros. Su aplicación para desarrollar objetos con nuevas propiedades es tan amplia y dispar que la envergadura se vuelve gigante, pese a ser conocida como la ciencia de lo pequeño. ¿Hasta dónde puede llegar?

Suena el despertador en tu teléfono móvil; sus chips incorporan nanomateriales. Vas al baño y una de las cremas cosméticas que usas para mejorar la piel contiene nanopartículas de oro funcionalizadas con ácido hialurónico. Después, para hacerte el desayuno, usas un cuchillo que tiene nanopartículas de plata incrustadas con actividad antimicrobiana. Son algunos de los ejemplos que pone Eva Pellicer, catedrática del Departamento

de Física de la Universidad de Barcelona (UB), para mostrar cómo lo nano forma ya parte de nuestro día a día.

Hay más de 11.000 productos a la venta en todo el mundo que incluyen nanotecnología, según recoge la base de datos del sitio web StatNano a la que nos referencia Pedro Serena, investigador del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Los hay en todos los sectores, pero los líderes son la electrónica (1.962), la medicina (1.318), la construcción (1.170) y la cosmética (1.011). Más atrás, también el textil, las cosas del hogar, la automoción y la alimentación. Por ejemplo, se mencionan las chocolatinas americanas M&M's, que llevan nanopartículas de dióxido de titanio, que se usa como colorante artificial y aditivo alimentario; en la Unión Europea está prohibido con ese uso desde 2022.

Si nos centramos en Europa, Serena menciona el observatorio que mantiene Dinamarca, The Nanodatabase, donde hay recogidos 5.367 productos, "incluidas cosas bastante curiosas, como refrigeradores con sistemas de purificación basados en nanopartículas de plata", señala.

"Hablamos de aplicaciones reales que ya están en nuestras vidas, no son estudios de laboratorio con perspectivas futuras. Hay sectores donde la nanotecnología está muy establecida desde hace muchos años", afirma Jordi Diaz-Marcos, coordinador de la Unidad de Técnicas Nanométricas de los centros científicos y tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiTUB) y de la Unidad de Divulgación de las Nanotecnologías, Nanodivulga UB.

Para fabricar esos productos, primero hay que idearlos. Si hablamos de producción científica a escala nano, China se desmarca y encabeza la lista, seguida de India y Estados Unidos; España está en el número 13. En cuanto a patentes, aquí gana por goleada EE. UU.; después Corea del Sur, China, Taiwán, Japón y Arabia Saudí. España ocupa el puesto 21.

Pedro Serena.

Eva Pellicer.

Átomo a átomo

Los fenómenos cuánticos que tienen lugar a escala atómica son complejos, y entender cómo se comporta la materia requiere una cantidad de conocimiento imposible de recoger en unas líneas. A esa escala, las nanopartículas cuentan con propiedades físicas y químicas nuevas y muy diferentes a las que tiene el mismo material a escala convencional. Por ejemplo, el superparamagnetismo de los nanoimanes, o mejoras en la conductividad eléctrica y térmica, o nuevos materiales, señala Serena.

Para manipular la materia a escala nanométrica y convertir las ideas cien-

Tabla 1. Cuánto miden los objetos a escala nanométrica

Átomo	0.1 nanómetros (nm).
Molécula de agua	0,27 nm.
ADN	2 nm de diámetro.
Chip más pequeño actual	5 nm.
Proteína (longitud)	10 nm.
Virus	25 nm.
Bacteria	200 nm de longitud.
Pelo humano (diámetro)	75.000 nm.
Hoja de papel (grosor)	100.000 nm.
Ácaro	1 M de nm.
Hormiga	1,8 M de nm.
Ratón (cuerpo sin cola)	80 M de nm.
Gato	460 M de nm.
Longitud del ADN humano extendido	1.000 M nm.
Persona de 1,75 m de altura	1.750 M nm.

María Ujué González.

IMN-CNM, CSIC

Equipo de litografía por haz de iones.

tíficas en realidad hacen falta potentes instrumentos, como los microscopios de sonda de barrido o el microscopio de efecto túnel, y técnicas muy avanzadas. El colmo de la complejidad es manejar los átomos de forma individual. En 2022, en un estudio publicado en *Science*, del que formaban parte investigadores del Centro Singular de Investigación en Química Biolóxica e Materiais Moleculares (CiQUS) de la Universidad de Santiago de Compostela, se consiguió manipular los enlaces entre los átomos de una molécula, uno a uno, para cambiar su estructura. Es decir, modificar moléculas átomo a átomo como si usaran "pinzas nanométricas", explicó uno de los autores. Un hito porque, hasta ahora, para conseguirlo había que introducir nuevos átomos y moléculas que interactuaran con las que ya había, y es lo que se sigue haciendo.

"El manejo átomo a átomo es algo bastante ambicioso. Se suelen utilizar otras técnicas, por ejemplo, microscopías de litografías, y vamos retirando material a través de *ataques*, por ejemplo, a siete nanómetros. Eso ya son un montón de átomos, no es átomo a átomo, pero es una estructura nanométrica, donde las propiedades de la materia van a cambiar",

Los nanomateriales de Dios

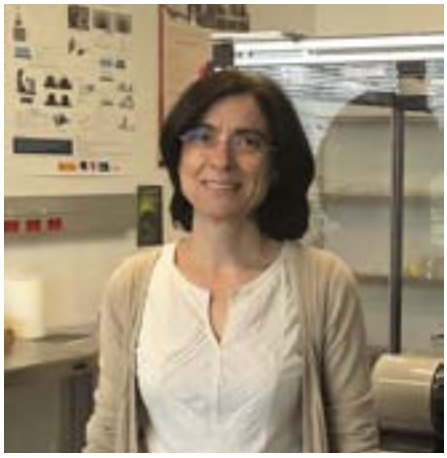
Dentro de la nanotecnología hay un amplio abanico de nanoobjetos. Están los más 'básicos' en los que podemos pensar, los átomos y las moléculas, que conforman la materia, pero también hay nanopartículas, transistores, nanotubos, cápsidas víricas… Y luego están los materiales. Hay un elemento, el carbono, que da forma a dos de ellos, de los que se ha llegado a decir que tienen propiedades casi divinas: los nanotubos de carbono y el grafeno.

Los primeros han conseguido récords de absorción de luz solar, así que su aplicación hace centellear los ojos de los investigadores en energía fotovoltaica. El segundo es un material bidimensional (solo tiene un átomo de espesor) muy

explica María Ujué González, científica titular en el Instituto de Micro y Nanotecnología (IMN-CNM, CSIC). En su laboratorio tienen equipos de litografía EBL, por haz de electrones, que sirve para "escribir con un haz de electrones motivos con un resolución de hasta 5 nanómetros en una resina sensible a los electrones, y así definir máscaras para posteriores ataques o deposiciones de materiales y formar estructuras de tamaños nanométricos". Y también FIG, equipo de litografía por haz de iones, "donde se graban directamente motivos de tamaño mínimo, en torno a los 7 nanómetros, sobre el material que queramos".

Los átomos también se pueden alterar con reacciones químicas, creando oxidaciones y generando poros de tamaño nanométrico que luego se rellenan con otro material; por ejemplo, aluminio. También hay técnicas para evaporar parte de los átomos y luego depositar otros; esto se puede hacer con oro y plata. "No es que tú vayas tocando átomo a átomo, sino que utilizas procesos para forzar que se muevan y luego choquen y se junten entre ellos para crear nuevas reacciones. Son procesos que requieren una precisión muy grande", subraya González.

En IMDEA Nanociencia, Isabel Rodríguez dirige el Grupo de Superficies Nanoestructuradas, donde trabajan en el desarrollo de materiales micro y nanoestructurados con funcionalidades nuevas o mejoradas, utilizando las tecnologías de nanofabricación. "Utilizamos litografía de nanoimpresión (NIL) para crear nuevos dispositivos o dotar a materiales poliméricos con nuevas funcionalidades. Es como un proceso de estampación de un molde que contiene litografiados motivos a micro o nanoescala sobre un polímero fundido. Tras el desmolde, permite la transferencia de patrones con una altísima resolución, de hasta unidades de nanómetro", detalla Rodríguez. La experta considera que esta tecnología puede hacer económicamente viable la fabricación de productos de consumo que incorporen nanotecnología, como usos en medicina.



Isabel Rodríguez.

Nanomedicina

Todas las aplicaciones son importantes y tienen impacto, pero es indiscutible que pensar en que la nanotecnología pueda ayudar a curar enfermedades como el cáncer es emocionante. Nanofármacos que viajan hasta el centro de la enfermedad, nanobiosensores para diagnósticos, y formas nuevas de investigar y testar tratamientos son algunas opciones.

También en las vacunas contra la COVID-19. "El ARN que se utiliza para los anticuerpos se encapsula en nanopartículas de lípidos para que pueda llegar protegido a donde está la información genética en nuestro cuerpo", explica González, del IMN-CNM. Es lo mismo que se puede hacer para introducir quimioterapias o inmunoterapias de manera local en las células cancerosas, "porque a veces lo difícil es poder llegar justo a la zona donde está el tumor". Esto se conoce como *drug delivery* (administración de fármacos) y hace que "se ab-

especial. Es muy ligero y tiene simultáneamente propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas. Gracias a las primeras ya se usa en polímeros y cementos, pero se investigan otras con prometedores resultados, como la superconductividad, y también para crear nuevos materiales bidimensionales que se puedan aplicar en la electrónica y la óptica, explica Pedro Serena. "Es el material más transparente que existe, y a la vez más resistente que el acero, mejor conductor que el cobre, más duro que el diamante… La combinación de sus propiedades es tan magnífica que llegaron a apodarlo como el material de Dios", cuenta Diaz-Marcos.

La Unión Europea ha hecho inversiones de miles de millones de euros para su investigación y ha puesto en marcha proyectos como el Programa Europeo Graphene Flagship, con el objetivo de llevar el grafeno de los laboratorios académicos a la sociedad europea.

"Es cierto que no todas las perspectivas esperadas del grafeno han llegado ya al mercado, tenemos que tener paciencia, porque los métodos de fabricación son complejos", alienta Diaz-Marcos. Eso no quita que ya haya en el mercado productos reales que lo utilizan, como enumera el experto: baterías de drones, electrónica, pantallas táctiles flexibles, auriculares, ordenadores, altavoces, motos, calzado y material deportivo… Hay un ejemplo que seguro que nos suena: la raqueta de Novak Djokovic. "Estos son solo algunos productos, pero estoy seguro de que en los próximos años llegarán más, sobre todo combinaciones de telecomunicaciones, electrónica y medicina", vaticina.

Riesgos y nanolegislación

Cualquier tecnología es buena o mala según se use y según se tengan en cuenta todos sus posibles efectos, tanto beneficiosos como perjudiciales. Como las demás, la nanotecnología tampoco escapa a esos posibles riesgos; más aún tratándose de una rama que se puede aplicar en tantas áreas, materiales y productos del día a día. Por eso, Eva Pellicer recuerda que "lo más importante es implementar una buena gestión para saber cómo afrontarlos y encontrar las medidas paliativas necesarias".

La investigadora reconoce que lo que más zozobra le genera es el tema de los residuos a escala nanométrica: "Es importante que estos residuos que se generan se traten de forma eficiente y no causen ningún deterioro del medioambiente ni los ecosistemas por contaminación accidental de suelos, aguas o aire". Para evitar esto, hay que pensar desde el ecodiseño y en el ciclo de vida completo del material, no solo el que vive el usuario final. "Si me compro una raqueta de tenis con nanotubos de carbono y la tiro a un vertedero a los tres años, allí se pulveriza y se descompone hasta que las nanopartículas acaban en el medioambiente; por ejemplo, en el agua subterránea… ¿Qué puede suceder con ese nanomaterial?", se pregunta Serena. Lo mismo ocurre con unas zapatillas o cualquier otro textil.

También puede haber riesgos para el ser humano. Por ejemplo, si hay nanomateriales que se introducen en la cadena alimenticia y acaban llegando a nosotros, como peces ingiriendo nanoplásticos que acabaríamos comiéndonos; o si se usan sustancias de tamaño nanométrico para mejorar el envasado de los alimentos o aumentar su valor nutricional, su sabor o su textura. "Es algo que puede parecer inocuo, pero cuando lo convertimos en nano no sabemos cómo van a cambiar sus propiedades. Algo de ese tamaño puede entrar en las células y modificarlas, y ahí los efectos son diferentes. Podrían ser desde cambios en el metabolismo hasta interferencias con el material genético y dar lugar a mutaciones", detalla Serena.

Otra vertiente son los riesgos de índole política y social. El investigador del CSIC señala el posible uso militar de la nanotecnología y también que se acentúe la brecha entre países ricos y pobres (como puede pasar también con cualquier otra tecnología).

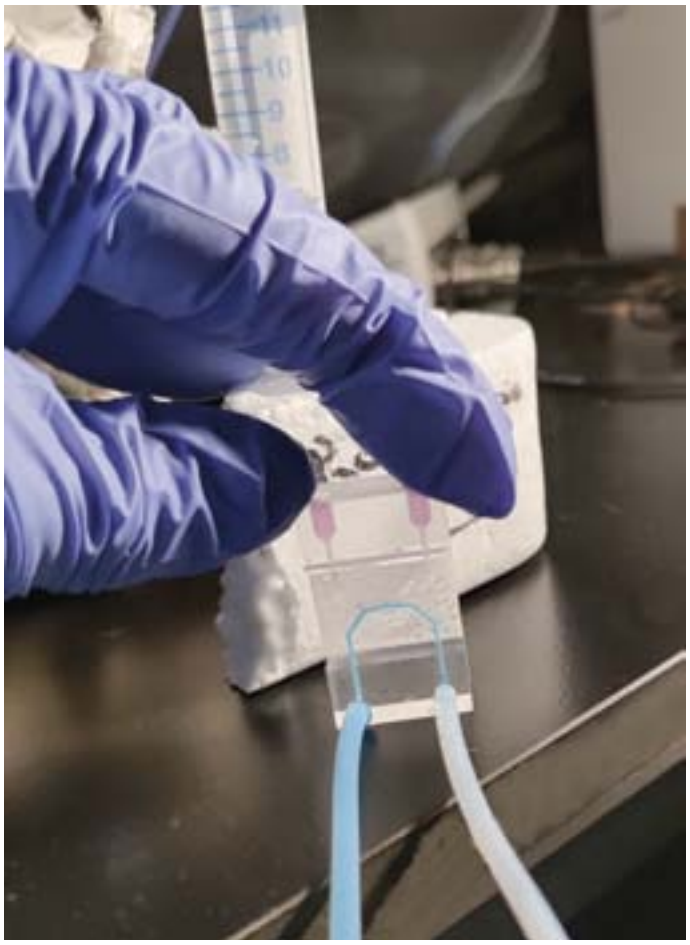
Ante los riesgos, se llama a la puerta de la regulación para que lo positivo siga ganando en la balanza. Pero como a menudo ocurre, y como ahora estamos viendo con la inteligencia artificial, la regulación va más lenta que el desarrollo científico. El primer obstáculo puede ser lo más básico: una definición. "Nos llevó años consensuar una definición de nanomaterial en el reglamento europeo de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas (REACH, por sus siglas en inglés) que cubriera toda la casuística existente y, claro, no puedes regular algo que no tienes claro qué es", dice Pellicer.

A partir de ese punto, la *nanolegislación* está en continua actualización para incorporar las novedades, siempre con la prudencia que caracteriza a la Unión Euroepa, que se considera, según Serena, una zona "nanosegura". Ya existe legislación en lo que se refiere a comercialización de productos que incorporan nanotecnología, y los nanomateriales están cubiertos por el mismo marco normativo que garantiza el uso seguro de todas las sustancias químicas y las mezclas: los reglamentos REACH y CLP, de etiquetado. "En concreto, su uso en medicina está muy controlado, en Europa por la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) y en Estados Unidos por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA)", añade Pellicer. También hay disposiciones específicas para los nanomateriales en otros sectores, como la legislación en materia de alimentos, biocidas y cosméticos. ◗

sorban justo donde se necesita y se minimicen los efectos secundarios". Se consigue aplicando un campo magnético con luz para que las nanopartículas se calienten localmente y roten, y así es como se pueden manipular y atravesar mejor los tejidos.

En el grupo de Rodríguez, en IMDEA Nanociencia, trabajan en dispositivos denominados *tumores en un chip* para crear *in vitro* un modelo de tumor. "Son dispositivos microfluídicos que fabricamos mediante microimpresión en polímeros y permiten la observación en tiempo real de procesos dinámicos. Recreamos el microambiente tumoral y las barreras fisiológicas más importantes para el transporte de nanofármacos administrados por vía intravenosa hasta su entrega a los tumores", explica. Así pueden evaluar y predecir parámetros de transporte, para saber cómo llegarían a un tumor real. "Los dispositivos *tumor en un chip* son una herramienta útil para los ensayos preclínicos en el desarrollo de nuevas nanomedicinas, y se ha planteado como alternativa para reducir las pruebas con animales", añade la investigadora.

Poder disponer modelos fisiológicos personalizados en un chip y que se pue-



Chip microfluídico.

Jordi Diaz-Marcos.

dan hacer a gran escala también permitiría avanzar en tratamientos personalizados, algo clave en una enfermedad como el cáncer. "La incorporación de tejidos tumorales de pacientes, obtenidos de biopsias, es el próximo desafío en la tecnología de *tumor en un chip*. En estos modelos personalizados se podrán probar diferentes terapias y seleccionar la más eficaz y adecuada para cada paciente antes de ser administrada", asegura Rodríguez.

Hay mucho en fase de investigación. En el Vall d'Hebron Instituto de Oncología se lleva a cabo un estudio clínico para usar nanopartículas para el tratamiento del cáncer de páncreas localmente avanzado, uno de los más mortales. En el CSIC trabajan con distintos recubrimientos de nanopartículas de hierro como terapias inductoras de estrés oxidativo para tratar el cáncer.

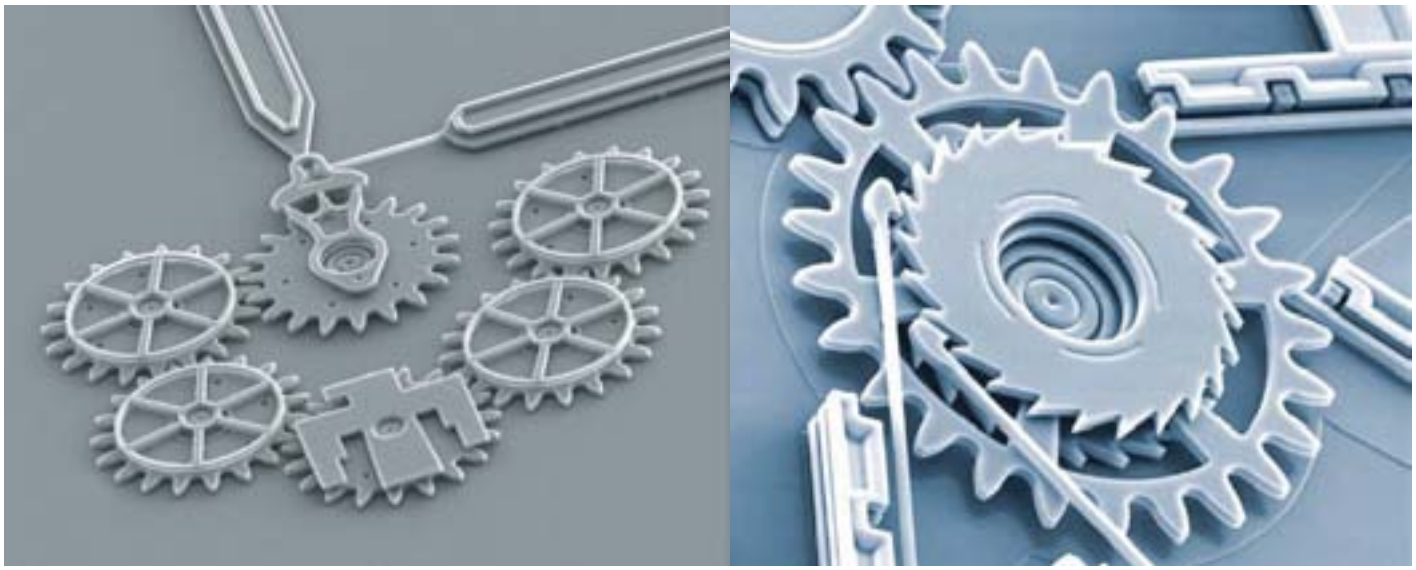
Pellicer, de la UB, recuerda que el uso real de nanopartículas en medicina, y en particular en oncología, "quizás está algo más retrasado porque tienen que pasar filtros muy estrictos de las correspondientes instituciones regulatorias". Pero ya hay empresas farmacéuticas que tienen en su catálogo algunos productos que incorporan nanopartículas para detección y tratamiento del cáncer, como Nanotherm® y sus nanopartículas de óxido de hierro recubiertas de silanos para hipertermia magnética: "Las nanopartículas generan calor al ser expuestas a un campo magnético alterno externo, provocando la muerte del tumor pero resultando inocuo para los tejidos circundantes".

En construcción y energía

En el sector de la construcción la nanotecnología hace que los materiales y edificios adquieran propiedades que pueden parecer mágicas. ¿Una superficie que se come la contaminación? Más o menos esto consigue el óxido de titanio, que hace una especie de efecto fotosíntesis. "Si la contaminación orgánica que pueda salir de los coches y en general de las ciudades se queda atrapada en el agua y entra en contacto con el óxido de titano, se puede eliminar. Gracias a estas propiedades superoxidantes se ha utilizado en pinturas para el revestimiento y fachada de los edificios", explica Diaz-Marcos. Es un efecto que se está estudiando para evitar problemas como la rápida saturación de la superficie.

También hay productos que pueden ser superhidrofóbicos, como el óxido de silicio a nanoescala. "Si recubrimos con estos nanomateriales una superficie esta no se moja; cuando la gota entra en contacto con la superficie resbala y puede arrastrar la suciedad. Es como si fuera autolimpiable", indica. Esto se puede usar en edificios, cocinas y también para fabricar nuevos aceros haciéndolos más resistentes a la corrosión y a la fatiga.

Las nanopartículas también se están usando para rellenar granos de cemento y mejorar sus propiedades, como reducir la porosidad, evitar la fisuración y mejorar la resistencia. Es lo que ocurre con el nanocemento de la empresa BASF, ejemplifica Diaz-Marcos: "Gra-



Ejemplos de mecanismos y engranajes de unas decenas de nanómetros utilizados en máquinas casi invisibles.

cias a la combinación de propiedades de los nanomateriales podemos lograr materiales que sequen más rápido, sean más eficientes y reduzcan los tiempos de fabricación en la construcción".

En el caso de las energías renovables, hay registrados 591 productos en todo el mundo que contienen nanotecnología, de 422 compañías en 43 países distintos. Por ejemplo, las nanoestructuras 3D se pueden utilizar para la fabricación de paneles solares y hay nanorecubrimientos que se usan en las palas de los aerogeneradores, como nanotubos de carbono. También se está trabajando en nuevas baterías y pilas de combustible con nanomateriales para la conversión de hidrógeno, señala Serena, del CSIC.

En el ámbito nuclear, se investiga el uso de nanomateriales para fabricar reactores más eficientes y para gestionar de forma más segura los residuos nucleares. Por ejemplo, nanopartículas para los sistemas de seguridad que actúen como un refrigerante si se produce un accidente, y sensores de detección. También se podrían usar nanomateriales absorbentes para detectar fugas radiactivas que puedan producir contaminación en el agua, ejemplifica Serena: "Con poros nanométricos y sistemas de membranas con materiales nanoporosos podríamos mejorar la depuración del agua y descontaminar". En la base de datos de StatNano hay varios productos registrados bajo estas funciones en Japón y Rusia. También hay (y puede haber más en el futuro a medida que avance la investigación en óxido de uranio) nanopartículas en el combustible nuclear.

Todo esto para conseguir electricidad, así que también es de recibo contar que, según los expertos, la próxima generación de iluminación LED también tendrá nanotecnología. "Con nanomateriales se puede aumentar la intensidad y el brillo de los colores a la vez que mantenemos la eficiencia energética, y se puede usar en pantallas y bombillas", añade Serena.

Una tecnología transversal

Como se deduce, la nanotecnología no es una única tecnología, sino un término paraguas a muchos procesos y herramientas, y también es una tecnología horizontal, como la informática o la biotecnología, que facilita el camino a otras ramas y disciplinas. La Unión Europea la considera una KET (*Key Enabling Technology,* una tecnología facilitadora esencial para la innovación), recuerda Pellicer, por su potencial para abordar desafíos sociales, como el suministro de energía y la atención médica.

"Estas tecnologías transversales pueden aplicarse en todos los sectores, y ayudar a todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU", afirma Serena, que también es autor del libro *Nanotecnología para el desarrollo sostenible.* De hecho, la producción industrial sostenible y la agricultura son otros enfoques donde se puede usar la nanotecnología; por ejemplo, con los nanotransportadores, que permiten el transporte de productos con actividad biológica a lugares concretos de una planta.

Además, los conceptos de la nanotecnología son "trasladables". Por eso la importancia de los equipos multidisciplinares, donde se muevan las ideas y los nanomateriales puedan acabar usándose tanto en la industria de los pegamentos como en la biomedicina. Se trata de una tecnología que parte de lo ínfimo, inentendible, inimaginable, para llegar a ideas gigantes. De los nanomateriales de 10^{-9} a gigasoluciones de 10^{9}, y hasta donde la ciencia lleve.

Una de las sesiones del Congreso celebrado en Vancouver en 2022.

ICRP: un siglo orientando la protección radiológica mundial

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés), es una institución científica e independiente, reconocida internacionalmente como la fuente más fiable de información y opinión en el ámbito de la protección radiológica. Creada en 1928, está a cuatro años de ser centenaria. Durante esta larga historia ha proporcionado recomendaciones y orientación sobre todos los aspectos de la protección contra las radiaciones ionizantes. La trasparencia rige su trabajo y por ello se califica a sí misma como un libro abierto para la adopción de las medidas necesarias para reducir al máximo los riesgos derivados del uso de las radiaciones ionizantes.

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

Durante el VI congreso de la International Commission on Radiological Protection (ICRP), celebrado en Vancouver, Canadá, en noviembre de 2022, su actual presidente, Werner Rühm, realizó un llamamiento a fortalecer la experiencia que se tiene en protección radiológica para potenciar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de radiación usadas en la atención sanitaria, la energía y el medio ambiente con fines beneficiosos. "Es necesario que no se produzcan exposiciones injustificadas o un miedo también injustificado a la radiación, lo que afectaría al bienestar físico, mental y social", expresó Rühm.

La ICRP nació con la denominación Comité Internacional de Protección contra Radio y Rayos X (IXRPC), y adquirió la actual en 1950. Hoy forman parte de la Comisión más de 250 expertos de una treintena de países. La principal característica de esta organización internacional es su vocación altruista, al carecer

de ánimo de lucro. El trabajo que desarrolla y los frutos del mismo son de libre acceso, así como sus simposios bianuales y sus publicaciones, que recogen las prioridades necesarias en investigación para ser consideradas por la comunidad científica internacional. Hasta la fecha, la ICRP ha generado más de cien publicaciones sobre todos los aspectos relativos a la protección radiológica. La mayoría de ellas aborda un área particular, pero algunas, las llamadas recomendaciones fundamentales, describen el sistema general en esta materia.

En su horizonte más próximo está la revisión y la actualización de las recomendaciones generales sobre el sistema de protección radiológica de próxima generación. Si bien actualmente, como afirma la organización, es sólido y ha funcionado bien, debe adaptarse para abordar los cambios surgidos de la ciencia y la sociedad a fin de seguir siendo apto para su propósito de guía. Esta revisión implicará a organizaciones y profesionales de todo el mundo en grupos de trabajo y sus resultados darán lugar a una publicación que reemplazará a la número 103, que es la que está actualmente en vigor.

Su VII Simposio Internacional, celebrado en Tokio del 6 al 9 de noviembre de 2023, tenía como lema: *La evolución de la protección radiológica: ciencia y más.* Mediante la retroalimentación colectiva se pretendía también detallar la hoja de ruta para el próximo conjunto de recomendaciones fundamentales que guiarán este campo.

"El sistema de protección radiológica se basa en los conocimientos actuales de la ciencia sobre la exposición y los efectos de las radiaciones así como en los necesarios juicios de valor que deben tener en cuenta las expectativas sociales, la ética y la experiencia adquirida en la aplicación de los sistemas radiológicos. A medida que la comprensión de la ciencia y las expectativas de la sociedad han evolucionado con el tiempo, también lo ha hecho el sistema de protección radiológica. Además, las recomendaciones siguen teniendo en cuenta los nuevos usos de la radiación en medicina y otros campos, para ayudar a garantizar un nivel adecuado de seguridad en todas las circunstancias", explica Eduardo Gallego, catedrático de Ingeniería Nuclear en la Universidad Politécnica de Madrid.

Asistentes españoles al VII Simposio Internacional celebrado en Tokio en 2023.

Para Gallego, además de las cuestiones científicas y técnicas, son importantes las de carácter ético: "Evitar hacer daño a las personas es una de las recomendaciones clave de la ICRP. Por lo tanto, es necesario aplicar la prudencia cuando no se tiene el conocimiento pleno de una situación o de los posibles efectos derivados de las radiaciones, porque lógicamente hay en nuestro campo zonas de incertidumbre. Tal vez en otras áreas de la ciencia y la tecnología haya incluso más certidumbres, pero no aquí. Hay que velar por la dignidad y la justicia que merecen las personas sobre todo en situaciones post accidentes".

Los Comités de la ICRP

Muchos son los aspectos, campos y aplicaciones que debe abarcar la ICRP. Para ello cuenta en su organigrama con los llamados Comités, nombrados por su numeración ordinal.

El Comité 1 está centrado en los efectos de la radiación desde el nivel subcelular hasta los niveles de población y ecosistema, incluida la inducción de cáncer, enfermedades hereditarias y de otros tipos, el deterioro de la función de tejidos y órganos y defectos de desarrollo. Además, evalúa las implicaciones para la protección de las personas y el medio ambiente.

En el Comité 2 se analizan las dosis por exposición a la radiación. Este grupo desarrolla una metodología dosimétrica para la evaluación de la exposición a la radiación interna y externa, incluidos modelos biocinéticos y dosimétricos de referencia y datos de referencia y coeficientes de dosis, para su uso en la protección de las personas y el medio ambiente. María Antonia López, presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SERP), es actualmente la secretaria científica de este Comité sobre Dosimetría de Radiaciones. "Además formo parte de dos grupos de trabajo de este Comité: el TG 95, para desarrollo de coeficientes de dosis en caso de exposición interna, y el TG 112, para des-

arrollos de dosimetría en situaciones de emergencia", explica.

El Comité 3 aborda la protección de las personas cuando se utilizan radiaciones ionizantes en diagnósticos médicos, terapias e investigaciones biomédicas, así como actuaciones de medicina veterinaria. A este Comité pertenece Josep María Martí-Climent, director del Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica de la Clínica Universidad de Navarra. "La pertenencia a un Comité se establece por un periodo de cuatro años, renovable por otros cuatro. En mi caso estoy en el segundo periodo. Para mí supone un honor poder participar como experto y trabajar con personas de gran prestigio y de distintos países para elaborar las recomendaciones. Dentro de los ámbitos del Comité 3, al dedicarme a la medicina nuclear, esta subparcela dentro del gran campo de la medicina, creo que puedo aportar mi experiencia y contribuir con mis conocimientos. Cuando llegué promoví un grupo de trabajo sobre tomografía por emisión de positrones, trabajos que se han llevado ya a consulta pública".

El Comité 4 proporciona asesoramiento sobre la aplicación de las recomendaciones de la Comisión para la protección de las personas y el medio ambiente de manera integrada para todas las situaciones de exposición. Eduardo Gallego que participa en él, destaca de esta Comisión que "trata de dar las pautas y las mejores recomendaciones para proteger a las personas y al medioambiente de los efectos nocivos a partir de los hechos. Se trata de aprovechar la experiencia ya existente y aplicar el conocimiento, lo que se sabe por los estudios científicos, y tener en consideración los valores éticos y sociales para evitar que se creen desigualdades e injusticias".

Para Martí-Climent, la representación de España en la ICRP se puede ver como una botella medio vacía o medio llena. "Es positivo que seamos tres, aunque en uno de los comités España no tiene representante. Así que lo deseable sería tener al menos una persona en cada uno de ellos. Colaborar en las recomendaciones de los cuatro comités es importante porque como país nos permite tener todas las perspectivas surgidas de sus grupos de trabajo".

La ICRP ofrece sus recomendaciones a agencias reguladoras y asesoras y proporciona guías destinadas a servir de ayuda para la gestión y para el personal profesional con responsabilidades en materia de protección radiológica. En la mayoría de los países la legislación en este ámbito se elabora siguiendo las recomendaciones de la ICRP. Las normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes y para la seguridad de las fuentes de radiación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) se basan también en las recomendaciones de la ICRP, así como el Convenio 115 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Las recomendaciones de la ICRP forman la base de las normas, la legislación, los programas y las prácticas de protección radiológica en todo el mundo.

Josep María Martí Climent.

María Antonia López, responsable de Dosimetría Interna del CIEMAT, destaca que ambas organizaciones, la Sociedad Española de Protección Radiológica (SERP), que ella preside, y la ICRP son organizaciones sin ánimo de lucro, que promueven desarrollos científicos en protección radiológica. "La ICRP se focaliza en la protección frente a las radiaciones ionizantes, mientras que en la SEPR abordamos la protección tanto frente a las radiaciones ionizantes como no ionizantes. Y así como el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) aporta una cuota anual de apoyo económico a la ICRP, desde la SEPR no se apoya económicamente a ICRP, aunque se contribuyó en la campaña para el acceso libre a sus publicaciones en 2018".

Grupos de trabajo

La mayor parte del trabajo de la ICRP, en particular el desarrollo de informes que se publican en *Annals of the ICRP*, lo realizan los numerosos grupos de trabajo. A menudo, se establece un grupo de trabajo para desarrollar una única publicación, aunque algunos desarrollan más de una. En ocasiones se establece un grupo de trabajo para otros fines, como preparar asesoramiento para la Comisión Principal de la ICRP. Al establecer nuevos grupos de trabajo, la ICRP apunta cuestiones de interés para que los expertos aborden su estudio y selecciona candidatos según criterios de conocimiento sobre el tema.

Para María Antonia López, "las publicaciones de la ICRP contienen todos los avances científicos generados desde los grupos de trabajo, así como las recomendaciones relevantes en los distintos aspectos de la protección radiológica, y son documentación de referencia en Es-

paña y en el mundo. El ICRP además organiza con frecuencia bianual simposios científicos para presentar loss resultados de sus estudios y promover el debate sobre temas de actualidad en protección radiológica".

Desde la SEPR se hace un seguimiento muy cercano de los desarrollos de la ICRP, recogiendo y divulgando sus avances más relevantes, especialmente sus publicaciones; desde su página web, en el boletín que editan, en la revista *Radioprotección* y en el congreso conjunto. "La SEPR promueve la aplicación en nuestro país de las recomendaciones de ICRP, y aquí el CSN tiene un papel muy relevante también. Periódicamente la SEPR organiza junto con el CSN la jornada sobre los últimos avances de la ICRP; una jornada que siempre ha despertado mucho interés entre los socios y ha tenido una gran asistencia, y que permite también dar visibilidad a los miembros españoles que participan en los comités y grupos de trabajo de la ICRP", indica López.

Eduardo Gallego también destaca la relación estrecha que hay entre los distintos grupos de trabajo. "Hay grupos de trabajo en los que participan miembros de más de un comité. En el caso del TG 1, que se encarga de la densiometria, los efectos biológicos y la epidemiología, implica al Comité 3 y al Comité 4. Así, si se cambia alguna magnitud dosimétrica, el Comité 4 tiene que valorar cómo va a influir esto en el día a día, a cuánta gente, a cuántos sectores industriales o médicos afecta y si es relevante o no tener en cuenta los posibles cambios. La ciencia básica y su aplicación tienen que ir unidas".

Otro ejemplo que indica Gallego es el grupo de trabajo 36, que está bajo la supervisión de los comités 2 y 3, ya que trata de desarrollar coeficientes de dosis de radiofármacos administrados a pacientes en medicina nuclear de diagnóstico. Para el cálculo de los coeficientes de dosis para los pacientes, los nuevos modelos dosimétricos y biocinéticos se implementan con códigos informáticos. Esto también ha permitido desarrollar una aplicación móvil que proporciona valores de dosis efectivas y dosis en órganos para la ingesta de radionucleidos para personas ocupacionalmente expuestas, miembros del público y pacientes de medicina nuclear.

Josep M. Martí-Climent destaca la importancia de la transparencia y que la difusión de la información que se genera sean de dominio público. "Trabajar con especialistas de diferentes disciplinas, médicos, ingenieros, biólogos, y de distintos países enriquece los puntos de vista, ya que cada uno traslada sus diferentes experiencias generadas en sus lugares de trabajo y te permite contrastar los distintos conocimientos".

Los accidentes de las centrales de Chernobyl y Fukushima, han obligado a las distintas organizaciones del sector a estar en continua revisión de los riesgos radiológicos asociados a dosis altas y bajas y la necesidad de revisar los modelos biocinéticos y dosimétricos para el público en general y para los trabajadores. Así, el TG 99 se desarrolló a partir de 2017 como un grupo de trabajo conjunto entre el Comité 1 y el Comité 4, que se ocupa de proponer mejoras en el campo de la protección radiológica del medio ambiente, animales y plantas, aplicando la experiencia adquirida y las lecciones aportadas por dichos accidentes. Estos grupos de trabajo establecen coeficientes de dosis para calcular fácilmente la dosis después de la ingesta a diferentes edades, incluidos lactantes, embriones y fetos y sus posibles repercusiones.

"Yo estoy en el Comité 4, que se encarga de las aplicaciones, y hay especialistas de todos los sectores: médico, medioambiental, industrial, reguladores... Los distintos puntos de vista son fundamentales para el consenso, ya que las radiaciones se utilizan en muchas áreas",

GRUPO SENDA

María Antonia López.

GRUPO SENDA

Eduardo Gallego.

MARMADUKE ST. JOHN / ALAMY STOCK

Sala de control de una unidad radiológica hospitalaria.

explica Gallego. "Por eso, para conformar los grupos de trabajo se recurre a expertos que cubran cierta variedad de perfiles en cuanto a su experiencia y origen geográfico. A mí me eligieron por los proyectos europeos en los que había estado participando y mis actividades en España", explica.

Como muestra de la variedad de escenarios que aborda la ICRP se puede citar la protección radiológica de los astronautas en el espacio, objeto de la publicación 123, emitida en 2013. "Las tres últimas publicaciones de ICRP se han dedicado a la protección radiológica en la práctica veterinaria, la metodología para el cálculo del detrimento causado por la radiación y la dosimetría en exposición interna ocupacional", comenta María Antonia López.

Todos los grupos de trabajo dependen de la Comisión Principal, que es el órgano rector, que establece las políticas de la organización y ejerce la dirección general, mientras que la Secretaría Científica, ubicada en Ottawa (Canadá), gestiona las actividades diarias de la ICRP.

María Antonia López destaca que "actualmente la ICRP está trabajando prioritariamente en las nuevas recomendaciones de protección radiológica que se publicarán dentro de unos años, contando con la contribución de la Comisión Principal y de los cuatro comités operativos, además de grupos de trabajo estratégicos, que darán respuesta a interrogantes en temas de interés muy relevantes que afectan a los efectos biológicos de las radiaciones, como, por ejemplo, las enfermedades cardiovasculares, a las estimaciones dosimétricas y a la protección de de trabajadores, público, pacientes y medio ambiente".

Como explica la ICRP, los principios rectores de la nueva revisión incluirán: la confianza en una ciencia sólida y en valores éticos; la inclusión y accesibilidad, para que todos los que quieran contribuir puedan hacerlo; la búsqueda de beneficios con una amplia variedad de perspectivas; y la transparencia en el proceso.

Una consideración central de la revisión es la simplificación, ya que el sistema debe ser más fácil de entender, más fácil de comunicar y más fácil de usar. No obstante, su base subyacente debe ser sólida para manejar problemas complejos y considerar cuestiones científicas, éticas y prácticas complejas.

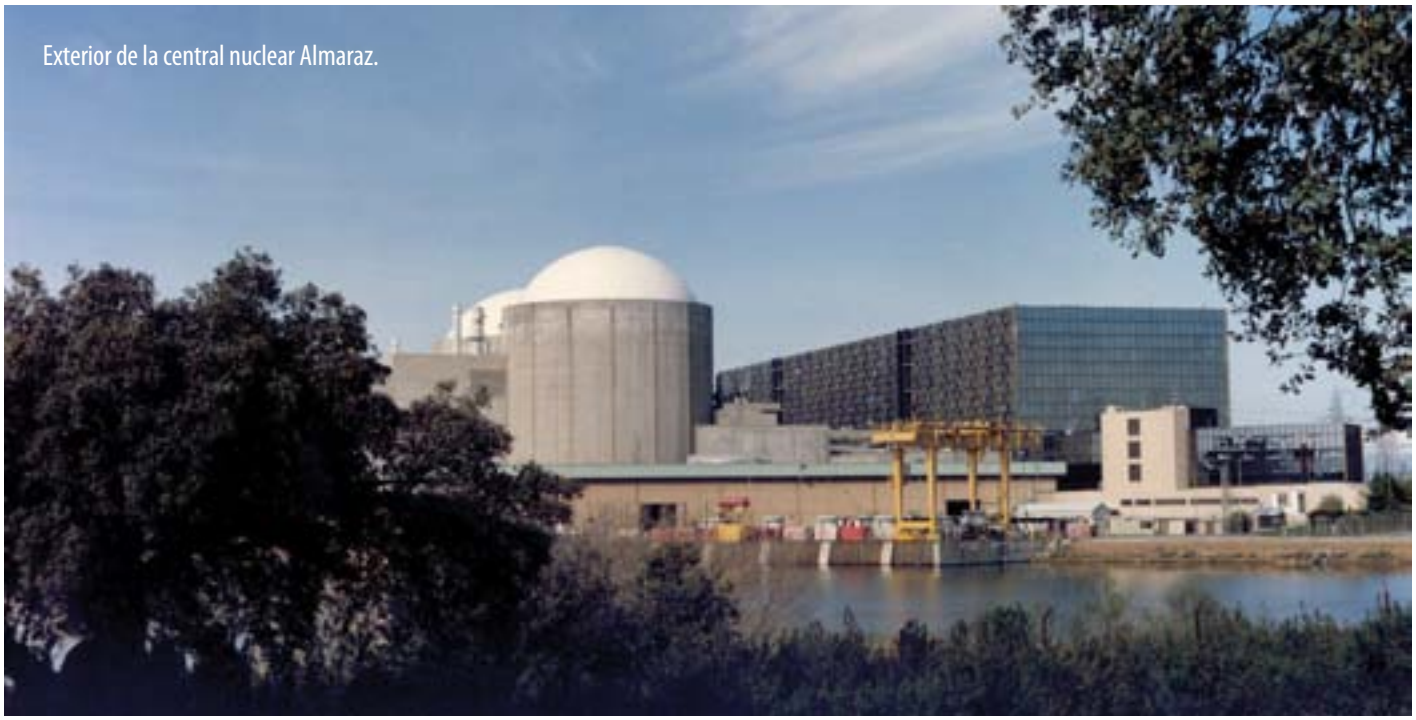
Programa de tutoría para jóvenes científicos

La ICRP pone también el énfasis en su programa de tutoría para alumnos universitarios y científicos que inician su carrera. Estos estudiantes se pueden integrar en los grupos de trabajo.

Para Eduardo Gallego es otro elemento a destacar, "desde hace unos años se está fomentando la integración de personas jóvenes que, aunque tengan menos experiencia, están activas en algún campo relacionado con las radiaciones ionizantes".

Los estudiantes pueden provenir de organizaciones educativas, gubernamentales, privadas o de cualquier otra índole. Se trata de un acuerdo voluntario a tiempo parcial, ya que pueden continuar trabajando en su organización de origen la mayor parte del tiempo. Para su aprendizaje se asignan tareas específicas y estos trabajos duran un año, con posibilidad de renovación.

El mentor normalmente es un miembro del grupo de trabajo y es el responsable de brindar orientación y apoyo, incluida la discusión y revisión de las tareas asignadas. Esta tutoría no supone coste alguno, ya que es la organización a la que pertenezca la que debe correr con los gastos asociados.


Exterior de la central nuclear Almaraz.

Migración a las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas en las centrales nucleares españolas

En el periodo comprendido entre junio de 2022 y junio de 2024, habrán entrado en vigor para las centrales nucleares de Almaraz, Vandellós II y Ascó las llamadas Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas (ETFM), tras la información favorable del CSN. La migración a las ETFM supone la modernización de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF). Dicha migración responde a un proceso conforme a la Instrucción del CSN IS-32 [1], que define las ETF como el conjunto de requisitos mínimos que garantizan la operación segura de una central nuclear y establece los criterios generales con los que se deben definir y revisar las ETF de una central nuclear durante su explotación. Las ETF constituyen un Documento Oficial de Explotación (DOE) requerido por el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas y son uno de los documentos en base a los que se concede y renueva, mediante orden ministerial, la autorización de explotación de cada central nuclear. El presente artículo sintetiza los diferentes procesos de migración de las ETF en las centrales nucleares españolas, la relación con los estándares americanos que han servido de referencia y las características más relevantes de las ETF resultantes.

■ Texto: **Leyre Armañanzas Albaizar y Javier Heredero Ruiz** ■ Subdirección de Ingeniería Dirección Técnica de Seguridad Nuclear ■

Las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) contienen el conjunto de límites y condiciones operacionales, así como las acciones a adoptar en caso de su incumplimiento, además de requisitos de vigilancia y otros requisitos, tanto técnicos como de gestión, que garantizan la operación segura de la instalación en todos los modos de operación, de acuerdo con las bases de diseño y los análisis y evaluaciones contenidos en el estudio de seguridad [1]. De esta forma, las ETF garantizan la conformidad con las hipótesis y objetivos de diseño que evitan situaciones que pudieran conducir a accidentes y, en caso de que estos ocurran, que se mitigarían sus consecuencias [2].

3.6.1 Contención

CLO 3.6.1 La contención debe estar OPERABLE.

APLICABILIDAD MODOS 1, 2, 3 y 4.

ACCIONES

CONDICIÓN	ACCIÓN REQUERIDA	TIEMPO DISPONIBLE
A. La contención inoperable.	A.1 Restablecer la OPERABILIDAD de la contención.	1 hora
B. No se cumple la Acción Requerida en el Tiempo Disponible asociado.	B.1 Estar en MODO 3. Y B.2 Estar en MODO 5.	6 horas 36 horas

Figura 1. Ejemplo de ETFM de un reactor de agua a presión (PWR) de tecnología Westinghouse - CLO, aplicabilidad y acciones del recinto de la contención del reactor.

Central nuclear Vandellós II.

La herramienta principal de las ETF para conseguir estos objetivos son las condiciones límites de operación (CLO), que establecen los requisitos mínimos que deben cumplir ciertos elementos (estructuras/sistemas/componentes, variables de proceso, características de diseño y parámetros de operación), para garantizar la operación segura. Por ejemplo, la disponibilidad mínima de los sistemas de mitigación a los que se da crédito en los análisis de los transitorios y accidentes considerados en el diseño o el mantenimiento de los parámetros que son condiciones iniciales de dichos análisis dentro de sus rangos aceptables, durante todas las condiciones de la planta en que estos sucesos estén postulados (aplicabilidad de la CLO). Además, para demostrar el cumplimiento de cada CLO se requiere la realización satisfactoria de pruebas, calibraciones e inspecciones periódicas asociadas, llamadas requisitos de vigilancia (RV).

Si una CLO no se cumple, las ETF requieren la adopción de acciones compensatorias y/o de recuperación, y establecen los tiempos disponibles para adoptarlas. Transcurridos estos tiempos sin haber realizado las acciones requeridas, o incluso antes, las ETF requieren llevar la planta a una condición segura (ver figura 1).

Los fundamentos técnicos de las ETF están recogidos en las bases de las ETF, las cuales son fundamentales para interpretar y aplicar correctamente cada ETF; estas bases no tienen consideración de DOE.

Dada la relevancia de las ETF, estas afectan de manera significativa a la actividad reguladora del CSN, que evalúa las solicitudes de cambios y en inspecciones verifica su adecuado cumplimiento. También son relevantes en la supervisión del funcionamiento de las instalaciones, incluyendo el envío al regulador de informes técnicos en determinadas situaciones.

El organismo regulador nuclear de EE. UU., la Nuclear Regulatory Commission (NRC), publica desde 1975 estándares de ETF específicos de cada tecnología presente en los reactores de dicho país, que sirven de base para la elaboración y el licenciamiento de las ETF para cada central nuclear.

En España la adaptación de las ETF ha requerido, además, el cumplimiento de la normativa nacional y otros requisitos reguladores.

Estándares mejorados de ETF

En 1992 la NRC publicó un nuevo tipo de estándares de ETF que presentaban cambios sustanciales, y que eran el resultado de un proceso significativo de mejora y de un esfuerzo conjunto con la industria iniciado en los años 80. A este proceso se le denominó Programa MERITS (Methodically Engineered, Restructured, and Improved Technical Specifications) y las ETF y las bases elaboradas a partir de estos estándares se conocen como ETFM (ver figura 2).

La NRC mantiene estos estándares y los revisa periódicamente, incorporando cambios llamados *travelers,* propuestos habitualmente por los grupos de propietarios de EE. UU., y que son evaluados y aprobados por la NRC a través de su

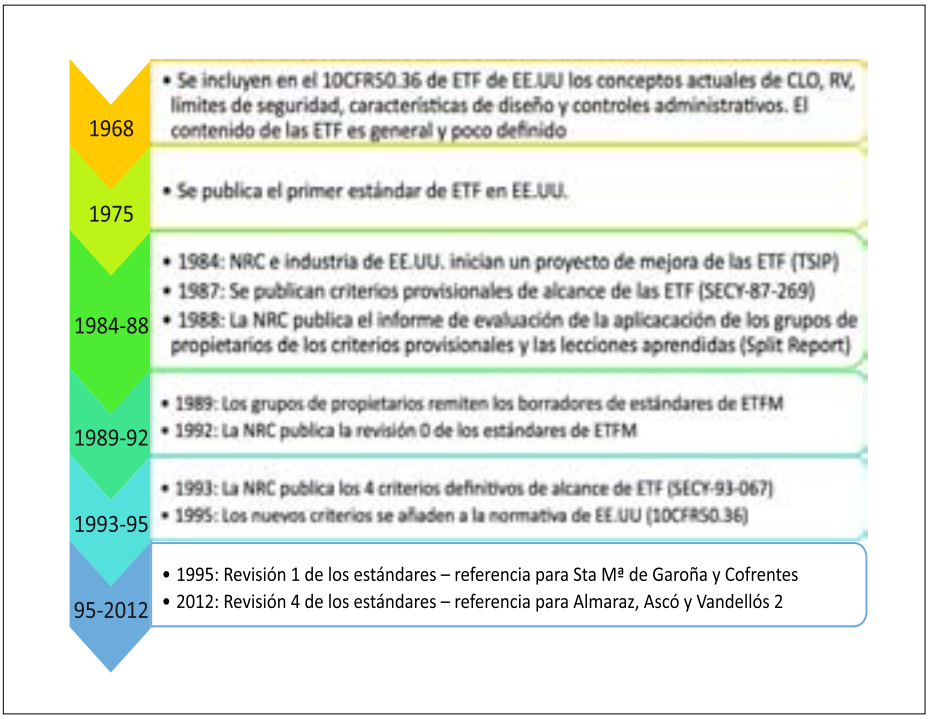


Figura 2. Hitos principales del desarrollo de las ETF Mejoradas en EE.UU.

Tabla 1. Estándares de ETFM publicados en 1992 y su aplicación a las CCNN españolas

Estándares de ETFM		Referencia utilizada en
Tecnología	Estándar	las ETF de CCNN españolas
Babcock and Wilcox	NUREG-1430	N/A
Westinghouse	NUREG-1431	Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II, Trillo
Combustion Engineering	NUREG-1432	N/A
General Electric BWR/4	NUREG-1433	S.Mª Garoña (para las ETFM durante la explotación)
General Electric BWR/6	NUREG-1434	Cofrentes

departamento de ETF. La última revisión de los estándares es la número 5 de 2021 (ver figura 3).

Los nuevos estándares se desarrollaron con los siguientes objetivos de mejora (ver figura 4):

1. Adaptar el contenido de las ETF a unos nuevos criterios establecidos previamente por la NRC.
2. Mejorar el contenido técnico de las ETF en base al conocimiento y experiencia adquirida desde la emisión de los estándares previos de ETF.
3. Orientar el uso de las ETF a la operación de las plantas mediante una organización y formato optimizados, haciéndolas más claras, fáciles de usar y efectivas, lo que se soportó con estudios de factores humanos. Las nuevas ETF incluyen mejoras en la redacción y un nuevo formato tabular para las acciones y los requisitos de vigilancia de las CLO.
4. Disponer de unas bases detalladas y sistemáticas, ya que las de los antiguos estándares eran muy reducidas. Con las ETFM, las bases se constituyen como un documento aparte y adoptan la misma estructura. Se describen, justifican y referencian todos los elementos de las ETF, incluyendo su relación con las funciones de diseño y los análisis de seguridad. Para controlar los cambios a las bases, las ETFM establecen un programa específico, que en España referencia la IS-21 del CSN, sobre modificaciones en centrales nucleares [3].

Figura 3: portada del NUREG-1431 Rev.5, Vol. 1 Estándar de ETFM de reactores PWR Westinghouse.

Figura 4. Principales objetivos de mejora en el desarrollo de las ETFM.

De los aspectos anteriores, resultaba de especial interés optimizar y racionalizar el contenido, ya que la falta de criterios claros del alcance generaba en EE. UU. ineficiencias en el licenciamiento y un aumento del tamaño de las ETF. Para ello se establecieron cuatro criterios que definen los elementos que deben incluirse en las CLO de las ETF.

En la tabla 2 se presentan los criterios de alcance de las ETF, según la IS-32 del CSN. Estos criterios cubren los objetivos generales de las ETF señalados al principio del artículo, de prevención y mitigación de transitorios y accidentes [4].

Tabla 2. Criterios del alcance de las ETFM (Apartado 4.2 del artículo 3º de la IS-32 del CSN)

N.º	Criterio de alcance	Ejemplos de CLO en estándares
1	Instrumentación para detectar e indicar en la sala de control una degradación anormal y significativa de barrera de presión del refrigerante del reactor.	— Instrumentación de detección de fugas del sistema de refrigerante del reactor (RCS)
2	Variables de proceso, características de diseño o restricciones operativas que constituyen una condición inicial en el análisis de accidentes base de diseño o de transitorios que suponen el fallo o desafío a la integridad de alguna de las barreras contra la liberación de productos de fisión.	— Margen de parada — Actividad específica del RCS — Temperatura de la contención — Tiempo de decaimiento del combustible irradiado
3	ESC a los que se les da crédito para mitigar un accidente base de diseño o transitorio en el análisis de accidentes base de diseño o de transitorios que suponen el fallo o desafío a la integridad de alguna de las barreras contra la liberación de productos de fisión.	— Recinto de la contención — Fuentes de corriente alterna (generadores diésel de emergencia) — Instrumentación del sistema de disparo del reactor
4	ESC importantes para la seguridad en base a la experiencia operativa o análisis probabilistas de seguridad.	— Sistema de evacuación de calor residual (RHR) — Panel de parada remota

Como resultado de la aplicación de estos criterios se han relocalizado fuera de las ETF entre el 40 % y el 45 % de las CLO de los antiguos estándares [5]. Estas CLO, junto con algunos programas y requisitos de tipo administrativo, se han llevado a un nuevo documento: el Manual de Requisitos de Operación (MRO).

Algunos ejemplos de ETF trasladadas al MRO al no cumplir ninguno de los cuatro criterios anteriores son la química del circuito primario del reactor y la instrumentación sísmica y meteorológica.

A diferencia de las ETF, el MRO no es un DOE. No obstante, en España es objeto de la supervisión y control del CSN y sus cambios están sujetos a los requisitos de la IS-21 del CSN [3]. El MRO presenta una estructura y un modo de empleo similar a las ETFM, aunque tiene algunas diferencias: sus bases forman parte del propio documento y son menos detalladas; sus reglas de uso admiten en ocasiones una mayor flexibilidad y se emplean términos diferentes a los de las ETF (ver figura 5).

La NRC animó a las centrales nucleares de EE. UU. a adaptar voluntariamente sus ETF a los nuevos estándares.

MRO 3.3.11 Detector de Vibraciones y Partes Sueltas

CLRO 3.3.11 El Detector de Vibraciones y Partes Sueltas debe estar FUNCIONAL.

APLICABILIDAD: MODO 1 y 2.

ACCIONES

Figura 5. fragmento de una ETF trasladada al MRO del sistema de detección de vibraciones y partes sueltas del circuito primario del reactor.

Tabla 3. Estructura de capítulos de las ETFM

N.º	Capítulo	Descripción
1	Uso y aplicación	Definiciones de términos, así como ejemplos de uso aplicables al capítulo 3.
2	Límites de seguridad	Límites de variables de proceso asociadas al mantenimiento de la integridad de las barreras físicas que protegen contra la liberación incontrolada (pastillas y varillas de combustible, circuito primario del reactor).
3	Condiciones límite de operación	Recoge las CLO ordenadas en categorías funcionales. Además, contiene las reglas generales de uso de las CLO y sus requisitos de vigilancia.
4	Características de diseño	Contiene características de diseño relevantes para la seguridad, relativas al emplazamiento, al núcleo del reactor y al almacenamiento de combustible.
5	Normas administrativas	Contiene requisitos varios de tipo administrativo. Algunos de los más importantes son la composición del turno de operación, los programas y manuales requeridos y los informes a remitir a la Administración según aplique.

El enfoque no prescriptivo de migración a las ETFM también se ha aplicado en España, ya que estas optimizan las ETF y conllevan una mejora significativa en la operación, pero no es una modificación requerida por motivos de seguridad, ya que las centrales contaban con unas ETF aprobadas que proporcionaban un adecuado nivel de seguridad.

Los estándares de ETFM organizan el contenido en cinco capítulos, que se describen en la tabla 3. Las bases aplican a los capítulos 2 y 3. El capítulo 3 es el más extenso con diferencia de los cinco, comprendiendo aproximadamente el 75 % de las páginas de las ETFM y unas 94 CLO en un caso de una central PWR española.

Migración a las ETFM de las centrales nucleares españolas

Los procesos de migración a las ETFM han sido, en general, largos y complicados, por los siguientes motivos principales:

— La alta complejidad de los temas técnicos tratados.
— La cantidad y variedad de la información tratada. Las ETFM, sus bases y el MRO, en sus diferentes revisiones, junto con los informes soporte del licenciamiento comprenden miles de páginas. Incluso si el diseño de las plantas es de la misma tecnología, como ocurre en las tres plantas y cinco reactores de Almaraz, Ascó y Vandellós II, en ocasiones se presentan diferencias significativas.
— El numeroso personal y departamentos técnicos implicados tanto del CSN como de los titulares.
— Las interacciones entre los titulares y el CSN, en forma de reuniones y comunicaciones técnicas. En el caso de la migración de Almaraz, Ascó y Vandellós II se han generado cientos de fichas de evaluación y resolución de discrepancias.
— La relación de las ETFM y el MRO con otros documentos de planta (programas, manuales e informes).
— La necesidad de compatibilizar el proceso con otros de licenciamiento, que además afectan en ocasiones a las propias ETFM.
— El establecimiento de un proceso con las debidas garantías para asegurar el resultado final.

En cuanto a la complejidad técnica, la migración a las ETFM no supone una tarea administrativa que implique la simple traslación de cada ETF existente a su ETFM. Tanto la elaboración por parte de las centrales como la evaluación por parte del CSN requiere un alto conocimiento técnico de los sistemas, de los análisis de seguridad aplicables y del diseño y funcionamiento de ETF y ETFM, dado que las centrales tienen especificidades, tanto en su diseño como en la redacción de las ETF, que hacen que la aplicación del estándar no sea en muchos casos directa. Por otro lado, en ocasiones los nuevos estándares conllevan novedades significativas cuyo impacto se debe analizar.

A continuación se describen estos procesos de migración de ETF en las centrales nucleares españolas.

Trillo

La central nuclear Trillo entró en operación en 1988. A diferencia del resto de reactores ubicados en España, de diseño americano, se trata de un reactor PWR suministrado por la empresa alemana Kraftwerk Union AG (KWU), cuyo diseño responde a una normativa de referencia diferente a la del resto de titulares.

La práctica alemana original era incluir los requisitos equivalentes a las ETF en el documento considerado como manual de operación. Sin embargo, en el permiso de explotación provisional concedido en diciembre de 1987 se incluyó la exigencia de disponer de unas ETF revisadas, que tuvieron un formato similar al del NUREG-0452, estándar de ETF de EE. UU., previo a las mejoradas. Para dicha primera versión la central consultó con el TÜV-Stuttgart para confirmar que todos los sistemas sujetos a ETF, así como la aplicación de acciones asociadas a su inoperabilidad y el alcance y la periodicidad de las pruebas periódicas de los mismos, coincidían con los requeridos por la especificación de seguridad en las centrales alemanas.

En 1991, el CSN requirió a la central nuclear Trillo una revisión global de las ETF. Esta revisión tomó como referencia de formato, reglas de uso y organización el estándar de ETFM NUREG-1431 en su revisión 0, con la particularidad de que incluyó un capítulo 5 de "Bases de las CLO y RV", relegando al capítulo 6 las normas administrativas. En estas nuevas ETF se mejoraron las especificaciones relativas a la mayoría de los sistemas, destacando la ampliación realizada sobre las correspondientes al sistema de protección del reactor y al sistema de limitación. La revisión general de las ETF de Trillo entró en vigor en noviembre de 2000.

Tras la entrada en vigor de la IS-32, el titular presentó a finales del 2012 una propuesta de modificación de las ETF, para incluir el sistema de agua de alimentación de arranque y parada y el sistema de distribución de agua desmineralizada, por tratarse de sistemas significativos para el riesgo, según el criterio 4 del alcance definido en la IS-32. Por el mismo motivo, en 2021 el CSN aprobó la relocalización de ciertas especificaciones al MRO.

A pesar de que el formato y organización de las ETF de la central sea similar al del NUREG-1431 ya mencionado, su diferente diseño, normativa de referencia y análisis de accidentes no posibilitan la adaptación de muchos aspectos técnicos del estándar de ETF, como por ejemplo las acciones asociadas a la inoperabilidad de ESC. Así, en la instalación los sistemas de salvaguardias tecnológicas constan de

cuatro subsistemas separados y redundantes, con capacidad del 50 %, a diferencia del diseño americano que opta por sistemas constituidos por dos subsistemas independientes con capacidad del 100 %.

Santa María de Garoña y Cofrentes

Las centrales nucleares Santa María de Garoña y Cofrentes son reactores de tecnología BWR/3 y BWR/6 de General Electric, respectivamente. La primera entró en operación en 1971 y actualmente está en fase de desmantelamiento, mientras que la segunda entró en operación en 1985.

En 1988 el grupo de propietarios españoles de reactores BWR (GPE-BWR), formado por estas dos centrales, presentó al CSN el programa de mejora de ETF y en 1990 realizó su lanzamiento. Poco después, la NRC emitió los estándares de ETFM NUREG-1433 y NUREG-1434 de estas tecnologías, cuya revisión 1, publicada en 1994, serían los documentos de referencia para la migración a las ETFM.

Entre 1992 y 1996 se mantuvieron reuniones sobre diferentes propuestas de secciones de las ETF remitidas por el GPE-BWR y evaluadas preliminarmente por el CSN. En 1996, el CSN editó una guía de evaluación que indicaba la documentación requerida, los criterios de evaluación, el contenido de los informes y los plazos previstos. En dicha guía se identifica, para cada especificación, el área técnica del CSN responsable para la evaluación y aceptación de la propuesta.

En junio de 2003 las ETFM entraron en vigor en Cofrentes y en abril de 2004 en Santa María de Garoña. En ambos casos, como consecuencia de la adaptación a los NUREG mencionados, se relocalizaron algunas especificaciones a otros documentos externos, como es el caso del MRO.

Actualmente y tras la transferencia en 2023 de la titularidad de Santa María de Garoña a Enresa, dicha instalación está en fase de desmantelamiento. A requerimiento del CSN se han emitido las ETF para la fase 1 del desmantelamiento. Para la elaboración de dichas especificaciones no hay un estándar de referencia, por lo que se han adaptado las especificaciones anteriores a las nuevas circunstancias.

Almaraz, Ascó y Vandellós II

Las centrales nucleares de Almaraz, Ascó y Vandellós II, comparten la misma tecnología de PWR Westinghouse de EE. UU. Sus reactores entraron en operación en 1981 y 1983 (Almaraz), 1984 y 1986 (Ascó) y 1988 (Vandellós II). Desde el origen de su explotación comercial tuvieron unas ETF basadas en el estándar de ETF inicial NUREG-0452.

Respondiendo a una iniciativa del CSN, Almaraz primero y posteriormente Ascó y Vandellós II presentaron en 2010 al CSN planes de trabajo para abordar el proceso de migración de sus ETF, tomando como referencia la revisión 3 del estándar de ETFM de su tecnología, el NUREG-1431. En 2011 el CSN emitió la IS-32 sobre ETF que establecía los 4 criterios ya mencionados.

En julio de 2015, el CSN emitió el documento de términos de referencia para la evaluación de las ETFM, en el que se establecía una propuesta de constitución de un grupo de evaluación (GTEM), el proceso para canalizar la interacción con las distintas áreas, los criterios preliminares y las características generales de la evaluación. Uno de los criterios fue garantizar la mayor homogeneidad posible entre las ETFM de las tres centrales.

Este grupo, compuesto por tres técnicos de diferentes áreas, coordinó y realizó la mayor parte de la evaluación de las tres centrales en paralelo. En los casos necesarios, el grupo transmitía y documentaba las consultas de la evaluación a otras áreas y técnicos del CSN.

En 2016 se estableció la guía de evaluación del proceso que desarrolló los criterios y las fases secuenciales del proceso de evaluación hasta la solicitud formal al Ministerio. Especialmente relevante era la necesidad de llevar a cabo un periodo de coexistencia de las ETFM, aprobadas previamente en las fases 1 y 2 por el grupo de evaluación, con las ETF vigentes. El objetivo era confirmar la idoneidad de dichas ETFM, que el personal de planta se familiarizara con los nuevos documentos y que se validaran los procedimientos asociados a los requisitos de vigilancia. Este periodo de coexistencia debía incluir al menos una parada de recarga,

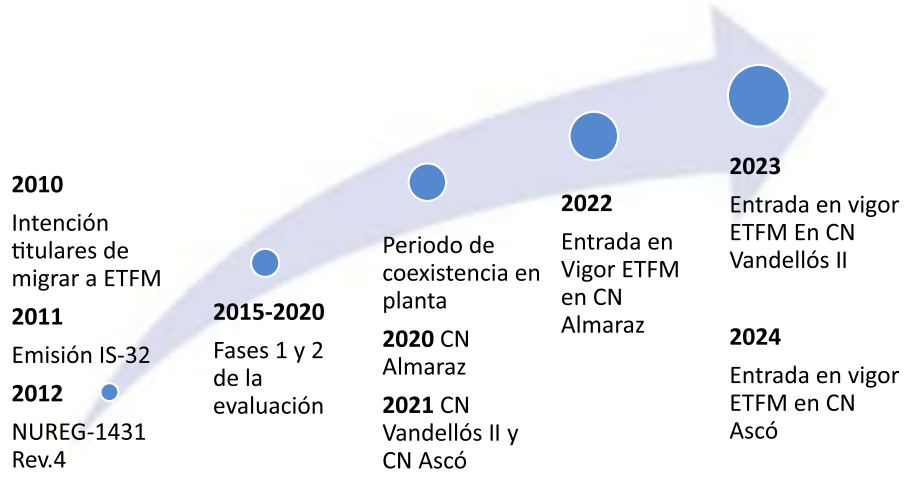


Figura 6: Principales hitos del proceso de migración a las ETFM de CN Almaraz, CN Vandellós II y CN Ascó.

ya que ciertas ETF solo aplican en esta situación.

En la primera fase, que abarcó el periodo 2015-2018, se evaluaron las revisiones iniciales de las ETFM, de las bases y del MRO, y se generó un primer informe de evaluación para cada central, que contenía los comentarios que reflejaban el dialogo entre el CSN y el titular sobre distintos aspectos técnicos y los formatos con las comprobaciones de cada ETF, que aseguraban un proceso de revisión sistemático. En esta etapa se mantuvieron reuniones con los titulares de las tres instalaciones con el objeto de tratar aspectos técnicos y unificar las tres propuestas.

La segunda fase tuvo lugar entre 2019 y 2020, y supuso la evaluación de las revisiones 1 y 2 de la documentación anteriormente indicada, que incorporaban los cambios derivados de la fase anterior. Incluyó adicionalmente el resultado del análisis de incertidumbres de parámetros de ETF, en aplicación de los artículos 6.2 y 8.4 de la IS-32. Todo este proceso se documentó para cada titular entre 2020 y 2021 en un informe y una nota de evaluación. Como resultado de esta fase el titular desarrolló la documentación correspondiente que se utilizó en el periodo de coexistencia, que incluía las ETFM y sus bases, el MRO y los nuevos procedimientos de vigilancia y prueba que se utilizaron conjuntamente con los vigentes.

En esta segunda fase se actualizó la composición del GTEM. Durante este proceso, los nuevos técnicos tuvieron el soporte de los anteriores miembros, que transmitieron la información asociada a la fase previa de la evaluación, todo ello enmarcado en un proceso de renovación y formación dentro del CSN.

En Almaraz el periodo de coexistencia en planta de las ETF vigentes y de las ETFM tuvo lugar entre febrero y septiembre de 2020, mientras que en el caso de Ascó y Vandellós II se realizó entre enero y diciembre de 2021. Como resultado de estos procesos los titulares emitieron informes soporte analizando los resultados y la afectación sobre los procedimientos de vigilancia que se habían validado.

Central nuclear Ascó.

En febrero de 2021, Almaraz remitió al Ministerio para la Migración Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) la solicitud de migración con la revisión 3 de las ETFM, sus bases y el MRO. Por su parte, Vandellós II y Ascó remitieron al CSN una revisión adicional de las ETFM en abril de 2022 y enviaron las solicitudes al MITERD en octubre y noviembre de 2022 respectivamente.

Las anteriores solicitudes, junto con las modificaciones remitidas al Ministerio posteriormente, dieron lugar para cada central a los informes finales de evaluación, en los que se tomó como punto de partida el trabajo realizado en las fases anteriores del proceso de evaluación.

La solicitud de migración a las ETFM de las dos unidades de Almaraz fue aprobada por el MITERD en marzo de 2022 y las ETFM entraron en vigor sustituyendo a las ETF existentes 3 meses después. En el caso de Vandellós II la aprobación se produjo en junio de 2023 y las ETFM entraron en vigor en septiembre de 2023.

Para evitar posibles interferencias de la implantación de las ETFM en el desarrollo de las recargas, Ascó solicitó que la entrada en vigor de las ETFM tuviera lugar simultáneamente para ambas unidades tras la recarga del grupo 2 de finales de 2023. En este sentido, en febrero de 2024 el CSN ha informado favorablemente al MITERD sobre la solicitud de migración de las ETFM, y está prevista su entrada en vigor a mediados del 2024.

Durante las diferentes fases del proceso los titulares debieron revisar la documentación, incluyendo los cambios derivados de la evaluación del CSN, pero también otros debidos a procesos de licenciamiento simultáneos derivados de nuevos requisitos reguladores, cambios normativos o a modificaciones implantadas.

Al tratarse de un proyecto singular, los titulares han desarrollado planes de implantación de las ETFM, programas de garantía de calidad específicos y procedimientos internos para abordar la actualización de su documentación, y han considerado la experiencia operativa de las centrales nucleares españolas, así como de la industria de EE. UU. Adicionalmente, han actualizado los planes de formación y entrenamiento del personal con y sin licencia de operación de cara a la entrada en vigor de las ETFM.

Aspectos técnicos singulares de la migración a las ETFM

A continuación se resumen algunas de las causas de diferencias de las ETFM respecto al estándar de referencia, comunes a las tres centrales durante la migración:

— Incompatibilidad con la normativa nacional. Por ejemplo, la IS-32 no admite cambiar la planta a un modo operativo superior amparándose en un análisis de riesgo ante el no cumplimiento de una CLO. En caso de descubrirse que no se ha realizado un requisito de vigilancia, tampoco pueden superarse las 24 horas para realizarlo.

— Diferencias de la normativa nacional respecto a la de EE. UU., que hacen necesario preservar requisitos existentes en las ETF. Este es el caso de mantener en las ETFM la obligación de llevar la planta a parada tras un terremoto de cierta magnitud o de notificar y enviar algunos informes especiales que no se encuentran en el estándar.

— Aplicación diferente de los criterios de alcance de las ETF, como es el caso de las CLO que limitan el movimiento de cargas pesadas en el edificio de combustible o el tiempo mínimo tras la parada del reactor antes de poder mover combustible, que se han mantenido en las ETFM.

— La preservación de algunas pruebas que no se encuentran en el estándar de las ETFM, como la medida de caudales de refrigeración de los equipos de salvaguardias.

— Cambios a los estándares ya aprobados por la NRC, que se incluyeron en revisiones posteriores a la de referencia y que se han considerado aceptables por el CSN, como es el caso de una nueva CLO para los sumideros de contención o la posibilidad de modificar el estado final de la planta en la secuencia de parada bajo determinadas circunstancias.

— Cambios que por su complejidad y alcance no se incluyeron en las ETFM, como la adopción de la CLO 3.0.9, que permite gestionar en base a análisis de riesgo la inoperabilidad de equipos de las ETF cuando se debe a la indisponibilidad de barreras (de inundaciones, de incendios o de otro tipo).

Conclusiones

En 2024, todos los titulares de las centrales nucleares españolas de tecnología americana dispondrán de unas Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas aprobadas por el CSN, ajustadas al estado de arte, respetando las características particulares de cada una de las instalaciones. Además, los titulares contarán con unas bases detalladas, que aportan las justificaciones que soportan y facilitan la comprensión de cada especificación. Estos documentos se complementan con otros controlados por los titulares, a los que se trasladan los sistemas que no cumplen con los criterios de alcance de las ETF de la IS-32.

La migración se ha apoyado en los estándares (NUREG-1431, 1433, 1434) emitidos por la NRC y ha supuesto un proceso complejo que se ha resumido en el presente artículo.

En el caso de la central nuclear Trillo, por las singularidades de sus sistemas y de su normativa de referencia, las ETF se ajustan al estándar americano en cuanto al formato y cuentan con unas bases que justifican con detalle el contenido de las especificaciones.

Cada proceso de migración y actualización de las especificaciones ha requerido revisar los contenidos del estándar, comparar y analizar el diseño y las ETF previas para finalmente adaptar el estándar ajustándolo a las particularidades de cada planta.

Todo el proceso de elaboración y evaluación de estas nuevas especificaciones ha requerido de un gran esfuerzo, tanto por parte de los titulares como por parte del CSN, y ha tenido una duración considerable.

La migración ha supuesto la optimización de las ETF y una mejora en la operación de las centrales. El proceso se ha desarrollado manteniendo en todo momento un adecuado nivel de seguridad en las plantas, garantizado por las anteriores ETF.

Referencias

[1] IS-26 del CSN, sobre requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las instalaciones nucleares, de julio de 2010.

[2] IS-32 del CSN, sobre sobre Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de centrales nucleares, de diciembre de 2011.

[3] IS-21 del CSN, sobre requisitos aplicables a las modificaciones en las centrales nucleares, de febrero de 2009.

[4] SECY-93-067 de la NRC, “Final policy statement on technical specifications improvements for nuclear power reactors” (ADAMS ML121840106).

[5] “Split report” de la NRC, de 1988 (ADAMS ML11264A057).

Pruebas de fugas del recinto de contención del reactor en centrales nucleares

El presente artículo describe las pruebas periódicas de fugas del recinto de contención del reactor (RC) de las centrales nucleares españolas. De acuerdo con la Instrucción IS-27 del Consejo de Seguridad Nuclear [1], el RC es una de las estructuras de una central nuclear que actúa como barrera, junto con las varillas del combustible y la barrera de presión del refrigerante del reactor, para controlar la posible emisión de material radiactivo.

Texto: **Ana Artigao Arteaga y Javier Heredero Ruiz |** Área de Ingeniería de Sistemas (INSI)

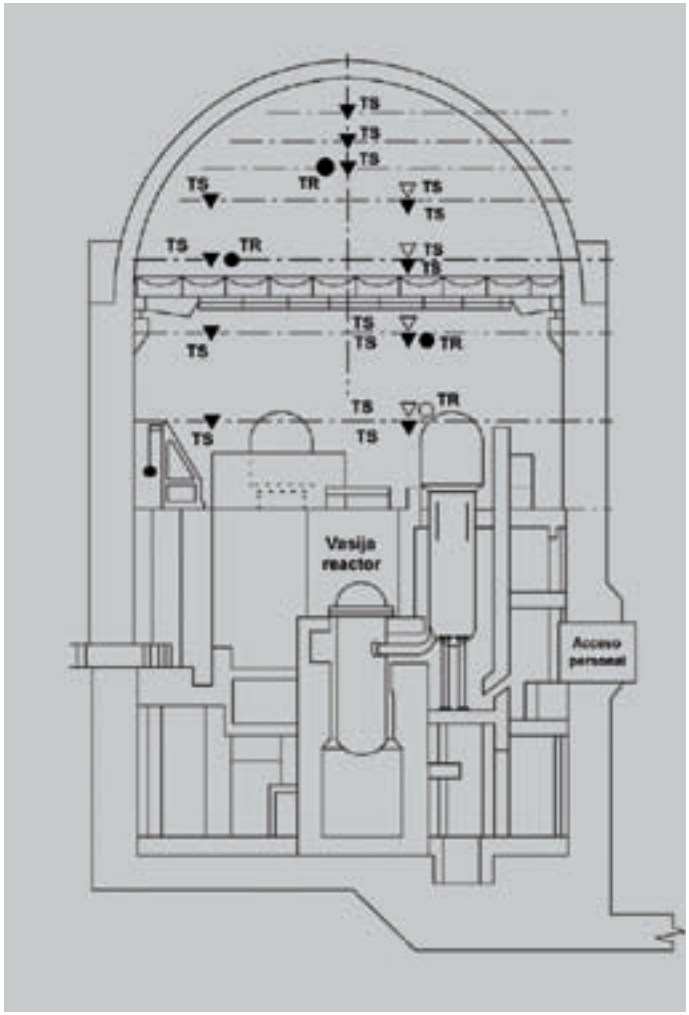
La estructura del RC, incluidas las esclusas de acceso y las penetraciones, se diseña como una barrera esencialmente estanca, que impide la liberación incontrolada de radiactividad al medio ambiente. El RC debe resistir con un margen suficiente las condiciones calculadas de presión y temperatura que se producirían en caso de accidente por pérdida de refrigerante, sin exceder su tasa de fugas máxima permitida [1].

Para garantizar que no se supera la tasa de fugas máxima permitida, las centrales nucleares nacionales de tecnología americana cuentan con un programa de pruebas de tasas de fugas del RC, de acuerdo con el apéndice J del 10CFR50 de EE.UU. En cuanto a la central nuclear Trillo, de tecnología alemana, a las pruebas de fugas se aplican principalmente los requisitos de la normativa de dicho país.

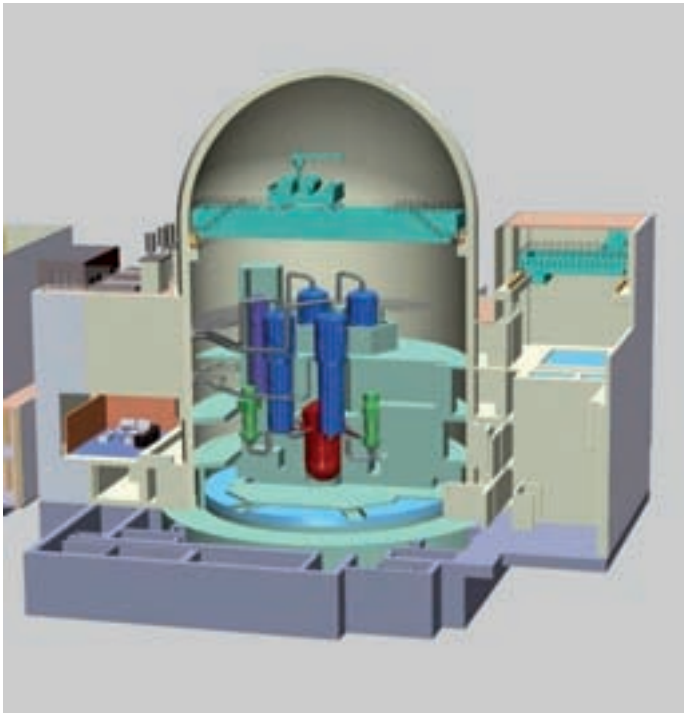
En el caso del apéndice J, las pruebas se clasifican en 3 tipos: A, B y C. Las pruebas tipo A son las conocidas como tasa de fugas integrada del RC (ILRT, por sus siglas en inglés), y las pruebas tipo B y tipo C como pruebas de tasa de fugas locales (LLRT). Las pruebas tipo B se aplican a posibles caminos de fuga del RC, como las penetraciones eléctricas, las penetraciones mecánicas sin válvulas o las esclusas de acceso. Las pruebas tipo C se aplican a las válvulas y las compuertas que aíslan la contención. Estas pruebas, realizadas en España por personal especializado de la empresa Westinghouse (anteriormente Tecnatom), se programan durante las paradas para recarga de combustible.

Compresores y secadores de aire empleados en la presurización del RC en una prueba ILRT.

[1] Instrucción IS-27 del CSN, revisión 1, de 14 de junio de 2017, sobre criterios generales de diseño de centrales nucleares.



Situación de sensores de temperatura seca (TS) y de rocío (TR) en la parte superior del RC para una prueba ILRT



Sección transversal de un RC en un reactor PWR de tecnología americana.

La prueba de tipo A o ILRT se realiza como máximo cada diez años, si el comportamiento en las pruebas anteriores ha sido satisfactorio. La prueba consiste en presurizar el RC y medir las fugas según el decaimiento posterior de la presión, siendo el valor de fuga máxima permitida exigente. Para ello se utilizan sensores de presión, humedad y temperatura repartidos por el RC, y se sigue una metodología estadística de tratamiento de los datos, que se procesan en tiempo real.

La ILRT implica una logística de preparación considerable, supone un hito esencial en las recargas y su realización se extiende varios días, durante los que se ejecutan las cinco fases principales: presurización, estabilización, prueba, verificación y despresurización.

Por su parte, las pruebas de tipo B y C (LLRT) se realizan en cada recarga a una parte de las válvulas de aislamiento y penetraciones del RC. La contabilidad de la suma total de fugas de todas las penetraciones se actualiza en cada recarga y tiene que ser inferior a una fracción de la fuga máxima permitida.

Las LLRT se realizan como máximo cada diez años para las pruebas tipo B y cada 60 meses para las pruebas tipo C, si el comportamiento de las pruebas anteriores ha sido satisfactorio. Además, las LLRT se aplican en cada recarga a algunos componentes específicos y, adicionalmente, a los que se hayan intervenido mecánicamente, pudiendo haberse visto afectadas sus características de fugas, y a los que hayan presentado mal comportamiento en sus pruebas de fugas anteriores.

Para tener una idea de la cantidad de pruebas que se realizan, una central nuclear PWR Westinghouse puede tener del orden de 80 penetraciones sujetas a las pruebas de tipo B y unas 200 válvulas sujetas a pruebas de tipo C.

Por su parte, en la central nuclear Trillo, la ILRT se ejecuta cada cuatro años, y la mayoría de pruebas de fugas locales de la contención en cada recarga, aunque debido a las características del diseño de esta central el número de pruebas de este tipo es considerablemente menor que en las centrales nucleares de tecnología americana.

Por la relevancia de todas estas pruebas, el CSN, y en concreto las áreas de Ingeniería de Sistemas, de Ingeniería Mecánica y Estructural y de Gestión de Vida y Mantenimiento, así como la Inspección Residente, realizan una supervisión detallada de las mismas.

William D. Magwood IV (Pittsburgh, Pennsylvania, 1961) dirige desde septiembre de 2014 la Agencia de Energía Nuclear (NEA), de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Licenciado en Física por la Universidad Carnegie Mellon en 1982 y con un máster en Bellas Artes en la Universidad de Pittsburgh, cuenta con una extensa experiencia internacional en temas de regulación y desarrollo de la energía nuclear. A lo largo de su trayectoria ha dirigido programas de investigación de servicios eléctricos y políticas nucleares en diversas instituciones, como el Edison Electric Institute, en Washington DC, y fue investigador en la Westinghouse Electric Corporation, en Pittsburgh. De 1998 a 2005 fue director del Programa de Energía Nuclear Civil del Departamento de Energía de Estados Unidos. En esa época estableció el Laboratorio Nacional de Idaho y lanzó importantes iniciativas, como el Foro Internacional Generación IV y el programa estadounidense Nuclear Power 2010, que ayudó a reiniciar la construcción de plantas nucleares en Estados Unidos. Entre 2010 y 2014 fue uno de los cinco consejeros de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de EE. UU., donde defendió la importancia de la independencia de los reguladores nucleares.

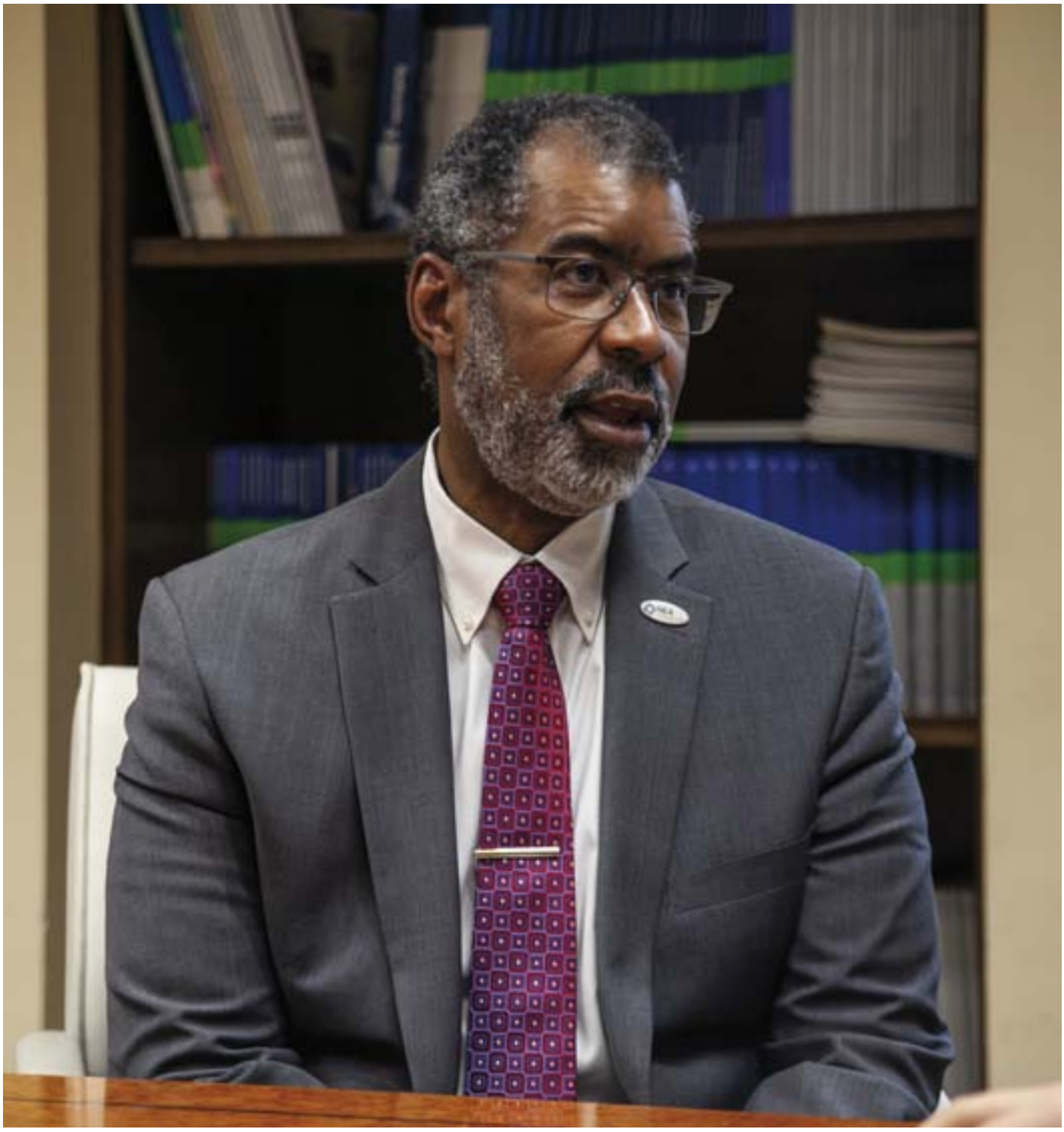
William D. Magwood, director general de la Agencia de Energía Nuclear (NEA-OCDE)

"La comunicación pública es una piedra angular de la seguridad nuclear"

■ Texto: **Adriana Scialdone García** | Área de comunicación del CSN ■ Fotos: **Julio Fernández González** ■

PREGUNTA: *¿Qué papel juega la NEA en el conjunto de asociaciones e instituciones de reguladores nucleares?*

RESPUESTA: La NEA ha existido durante más de 65 años y, principalmente, nuestro papel ha sido facilitar la cooperación entre los países más desarrollados en relación con el uso de la tecnología nuclear. Nuestros miembros suman alrededor del 85 % de toda la capacidad instalada y, por tanto, la mayor experiencia en regulación, política y gestión de residuos, así que reunimos a todos estos expertos para resolver los retos que surgen. Nuestro papel abarca todos los aspectos civiles de la tecnología nuclear, incluida la operación segura, el desarrollo de instalaciones nucleares, la regulación, la eliminación de los residuos, el desmantelamiento, la protección contra



la radiación, el derecho nuclear, la física nuclear... en realidad una amplia gama de áreas de la ciencia y la tecnología. Además, contamos con diferentes mecanismos para propiciar la cooperación y hemos ampliado nuestro mandato recientemente para incluir no solo la colaboración entre gobiernos, que ha sido nuestro sello distintivo durante muchos años, sino también al sector privado. En la actualidad, abarcamos mucho más de lo que hacíamos antes. Y lo que es más importante, estamos creando una red para que las universidades de todo el mundo cooperen para abordar los retos en el campo de la educación y la formación.

P: *Lleva casi diez años al frente de la NEA. ¿Cuáles considera que son los hitos de su gestión?*

R: Bueno, ha habido muchos cambios en la Agencia desde que llegué. Ahora

“Trabajamos para atraer a los jóvenes al sector y garantizar que haya suficientes profesionales cualificados en el futuro”

P: *Uno de los desafíos del sector es la disminución de las vocaciones entre los jóvenes. ¿Qué acciones está tomando la agencia para atraer a la próxima generación de estudiantes STEM?*

R: Este es un tema muy relevante, que se está discutiendo en todo el mundo. En España, el Gobierno trata de encontrar formas de atraer a más jóvenes a estudiar estas carreras y la NEA trabaja en atraer a las nuevas generaciones al sector para garantizar que haya suficientes profesionales cualificados en el futuro. Es una cuestión crucial para todos los países, porque cualesquiera que sean sus aspiraciones, construir nuevas plantas de energía nuclear, desmantelar las antiguas o construir instalaciones de residuos o de medicina nuclear, necesitan tener personal cualificado. La realidad es que no hay suficientes nuevos ingenieros y científicos para satisfacer esta necesidad. Además, en algunos países hay menos jóvenes que ingresan en la escuela primaria, lo que significa que los que se decidirán por estudios de ingeniería también será más pequeño. Nuestro desafío es llegar a estos jóvenes y encontrar a quienes quieran estudiar ciencias nucleares. Es un trabajo de divulgación que tiene que llevarse a cabo desde la escuela primaria, para que dé tiempo a involucrarse y alentar a los niños a perseverar para convertirse en científicos, estudiar matemáticas y ciencias y entusiasmarse con un futuro en esto. Es una labor muy gratificante. Creo que es más difícil que en mi generación. Yo crecí cuando teníamos un programa espacial y todo el mundo estaba entusiasmado con ir a la Luna. En la actualidad, no existen esas aspiraciones y creo que la gente simplemente se aferra a lo que tiene y no mira tanto hacia el futuro. Deberíamos recuperar ese entusiasmo por la ciencia.

P: *¿Cómo se anima a los jóvenes a cursar estas disciplinas científicas y de ingeniería desde la NEA?*

R: Estamos brindando plataformas para las personas que estén interesadas en ayudar con este tema, a través

hay más mujeres que hombres en cuanto a personal de gestión sénior. Es una cuestión que me enorgullece. Cuando llegué a la Agencia, nunca había habido una mujer al frente de una división técnica y durante mi mandato se nombró a la primera. Creo que este hecho lleva a la agencia al siglo XXI, pero también nos brinda acceso a más experiencia, energía y creatividad, porque nuestra plantilla ha cambiado. También me interesa centrarnos no solo en los aspectos técnicos de la seguridad, sino también en los aspectos humanos. Hay que reconocer que cosas como la cultura de seguridad o la comunicación pública son extraordinariamente importantes para el futuro del sector nuclear. Antes la agencia había tenido algunas actividades en estos asuntos, pero no un enfoque a largo plazo. Ahora se han convertido en la piedra angular de nuestro trabajo. Estoy muy orgulloso de que estemos trabajando estrechamente con el sector educativo, un aspecto determinante en la actualidad.

P: *Como comentaba, la igualdad y diversidad de género es un elemento importante. ¿Qué medidas está tomando la NEA en estas áreas para mejorar la situación?*

R: Este es uno de los aspectos de los que estamos muy orgullosos. Los datos decían que solo el 20 % de la fuerza laboral en ciencia y tecnología nuclear era femenina, lo cual es realmente poco. Identificado el problema consideramos que lo mejor para corregir la situación era una recomendación de la OCDE. Nos dijeron que nunca obtendríamos un consenso, pero seguimos adelante y, en junio de 2023, el ministro de la OCDE aprobó la recomendación, que aspira a atraer y retener a más mujeres al sector nuclear. Creo que sólo ha habido 17 recomendaciones en toda la historia de la OCDE y esta es la más reciente. Además, necesitamos abordar los desafíos a los que las mujeres deben hacer frente, como la obtención de posiciones de liderazgo. Hemos formado un grupo de alto nivel, en el que España participa activamente, con la consejera del CSN Pilar Lucio como representante, que recopilará información sobre qué puestos ocupan las mujeres en las diferentes organizaciones, su salario, su formación y cuántas avanzan hacia puestos de liderazgo, ya que hay muy pocos datos y muy dispersos. Hay que tener una imagen clara de la situación para poder paliarla. España es un ejemplo positivo para otros países, porque recopiló datos hace años y ha logrado un progreso increíble en muchas áreas; está mucho más equilibrada en cuestión de género que otros países.

P: *La NEA también trabaja desde hace una década en los aspectos culturales, humanos y organizativos que afectan a la seguridad. ¿Qué lecciones se han aprendido y cuáles ya se están implementando?*

R: Siempre hemos mantenido lo que llamamos una cultura de seguridad específica y ahora adaptamos un enfoque que analiza los aspectos culturales

de una forma global de educación nuclear. Hacemos planes estratégicos con los países para ayudarlos a formular lo que necesitan en un futuro y también hemos iniciado una serie de tutorías, hasta ahora en más de 20 países. Donde más nos estamos centrando es en lograr que más niñas se dediquen a la energía nuclear, a la ciencia y a la tecnología, y para esto tenemos seminarios en los que mujeres científicas e ingenieras de gran éxito se reúnen con chicas de secundaria para hablar sobre sus carreras y responder a sus inquietudes. Creo que estamos cambiando muchas vidas a través de esta labor, pero necesitamos expandir este modelo a todo el mundo para que más mujeres puedan tener modelos a seguir y no aceptar el tópico de que esto no es para chicas. Estoy muy orgulloso de que la NEA esté liderando el camino, creo que la gente en general y los jóvenes necesitan más modelos a seguir y más mujeres en este ámbito.

de las operaciones y la regulación como no se había hecho antes. Creo que todavía es demasiado pronto para sacar conclusiones generales, pero hemos tenido un buen comienzo. Una cosa para destacar es cómo entendemos el efecto de la cultura en la seguridad nuclear. Cada país tiene elementos culturales peculiares, que contribuyen a la seguridad y que pueden constituir desafíos. Las iniciativas emprendidas ayudan a comprender cuáles son esos elementos y brindan una oportunidad para mejorar su seguridad y desarrollar una formación específica. También existen características comunes a todos los países a pesar de que sus culturas sean diferentes. Estamos reuniendo un conocimiento único, que nos permitirá extraer conclusiones muy interesantes sobre comportamiento y cultura de seguridad nuclear. La gran lección aprendida es que nadie es perfecto y desde la NEA intentamos ayudar a minimizar el impacto de aquellas áreas en las que el cambio puede ser un desafío y donde juega un papel muy importante la formación.

P: *¿Diría que todo este trabajo sobre la cultura de seguridad se inicia tras lo sucedido en Fukushima?*

> *"España es un ejemplo positivo para otros países porque está mucho más equilibrada en cuestión de género"*

R: Para mí está claro que antes del accidente hablábamos y pensábamos en estos temas, pero no estaba entre las prioridades. Fue después cuando estos problemas alcanzaron un nivel de atención mucho más alto. De lo contrario, no creo que hubiésemos considerado prestar atención a la cultura de seguridad como lo estamos haciendo ahora. En la actualidad lo ponemos en primer plano gracias a las lecciones aprendidas de Fukushima Daiichi, ya que a partir de ahí se hicieron cambios en la regulación, la formación y la operación de todas las plantas nucleares, con equipos especiales para hacer frente a los riesgos de fenómenos extremos inesperados. Hemos realizado todo ese trabajo técnico de manera excelente, pero es mucho más complejo acometer cambios culturales en las propias organizaciones y la forma en que las personas reaccionan dentro de ellas. Sigue siendo un desafío y por eso es tan importante seguir trabajando en este tema.

P: *El CSN tiene una larga trayectoria de colaboración con la NEA, participando activamente en siete comités permanentes y en muchos subgrupos, así como en numerosos proyectos y programas interna-*

cionales de investigación y desarrollo coordinados por la Agencia. ¿Cómo valora esta colaboración?

R: Es excelente. En la reunión con el presidente del Consejo hemos hablado de todas las áreas en las que hay una fuerte interacción, comités, grupos de alto nivel, grupos de trabajo y grupos de expertos y estamos muy satisfechos con nuestra colaboración. El CSN es el socio más constante que hemos tenido en España durante muchos años. Los consejeros están muy involucrados en nuestras actividades, participando activamente en los grupos de alto nivel, en los distintos comités y asistiendo a nuestros talleres y actividades. Hemos acordado algunas áreas en las que queremos trabajar juntos, así que esperamos que nuestra colaboración se siga expandiendo.

P: *Según su experiencia, ¿dónde radica el valor principal de los expertos de los organismos reguladores en las actividades y objetivos de la NEA?*

R: Una de las cosas que he observado al interactuar con los reguladores que participan en la NEA es que, a diferencia de otras organizaciones internacionales, vienen para mantener conversaciones y debates directos y sustanciales con sus homólogos. No están aquí para transmitir conocimientos o discutir políticas, están aquí para resolver los problemas técnicos a los que se enfrentan y tratar de alcanzar una dirección común entre todos. El hecho de que países como Francia, Japón y Estados Unidos estudien el problema de la seguridad nuclear juntos es algo muy valioso. A menudo observo cómo los reguladores y los operadores trabajan más en equipo alrededor del mundo que antes de lo sucedido en Fukushima Daiichi y eso ciertamente se refleja en el contexto de la NEA. Hay conversaciones tremendamente valiosas y estudios conjuntos que demuestran que los países líderes, con mayor experiencia, pueden involucrarse y hacerlo en una atmósfera de cooperación y asociación. Esta es realmente una de las especialidades de la agencia y una de sus funciones más importantes.

P: *Los comités de la NEA revisan periódicamente su mandato, organización y prioridades para adaptarse a un panorama cambiante. ¿Cuáles son los aspectos más relevantes que debe abordar la Agencia desde una perspectiva estratégica?*

R: Aunque gran parte de la organización se ha mantenido estable durante muchas décadas, también tratamos de ver las cosas desde nuevas perspectivas a medida que avanzamos, y eso ha conducido a una cierta evolución. Por ejemplo, hace unos años creamos el Comité de Clausura de Instalaciones Nucleares y Gestión del Legado para trabajar en el cierre y desmantelamiento de las instalaciones. Queremos asegurarnos de que las mejores tecnologías y estimaciones estén disponibles para hacer frente a la nueva realidad. Pensando de manera más estratégica, creo que es justo decir que hace ocho o diez años trabajábamos de manera muy tradicional, en el sentido de que buscábamos el consenso en cada actividad, porque prácticamente todos los países de la NEA tenían puntos de vista similares sobre el futuro de la energía nuclear. Ahora, eso ha cambiado drásticamente y creamos grupos de países que estén interesados en temas específicos para trabajar en ellos y establecer marcos concretos. Este nuevo enfoque, en línea con otras organizaciones multinacionales, nos da mucha más flexibilidad, nos hace más receptivos y nos permite reaccionar ante distintas circunstancias y eso se refleja en muchas de las actividades actuales de la NEA.

> *"Estamos muy satisfechos con la colaboración entre la Agencia y el Consejo de Seguridad Nuclear"*

P: *Entre los avances tecnológicos más relevantes de la actualidad se encuentra la inteligencia artificial. ¿Cómo puede ayudar en el ámbito de la seguridad nuclear?*

R: Este año vamos a dedicar mucho esfuerzo a centrarnos en la inteligencia artificial y en cómo se aplica al sector nuclear. Ya hemos comenzado a analizar cómo se aplican las tecnologías individuales al sector y tuvimos un taller en Corea hace apenas unos meses que se centró en este tema. Fue muy interesante observar las ideas que surgen y creo que lo que se convertirá en una herramienta estándar en el sector serán los gemelos digitales (modelos virtuales que reflejan con exactitud un objeto físico, proceso o sistema y permiten realizar simulaciones para estudiar su comportamiento digital y adaptar las soluciones al producto real de manera eficiente). De hecho, hablé con algunos de los nuevos proveedores de tecnología de plantas nucleares y me dijeron que los gemelos digitales vendrán incluidos con el plan de venta de las centrales. Me atrevería a decir que pocos reguladores están preparados para lo que se avecina ya que estas tecnologías se están utilizando en muchas industrias, porque no cuentan con personal especializado. Se trata de un gran desafío. Habrá tensión entre lo que la industria quiere hacer y lo que los reguladores están dispuestos a aceptar. No podemos tener un sector nuclear que ignore estos desarrollos tecnológicos, porque si no seremos percibidos

como una tecnología anticuada. Tenemos que prepararnos para el futuro, lo que incluye la inteligencia artificial y otras tecnologías.

P: *En los últimos años, los pequeños reactores modulares (SMR) han ido ganando importancia. ¿Cuáles considera que son los principales retos que plantean?*

R: No creo que las nuevas tecnologías cambien absolutamente las reglas del juego. Las que pueden utilizar residuos nucleares como fuente de combustible serán un gran cambio, pero no los SMR. Pueden generar nuevos nichos en cuanto a solución energética en el futuro, pero sobre todo para aplicaciones particulares, no para satisfacer toda la potencia necesaria. Veo mucho más interés en construir grandes instalaciones de agua ligera. Creo que todo sucederá en paralelo, los reactores de agua ligera junto con estas nuevas tecnologías y, en un futuro, la fusión. Muchos creen que todavía faltan 50 años para conseguirla, pero si realmente llegamos a alcanzar el objetivo de emisiones cero será a través de una combinación de nuclear y renovables. Creo que la dialéctica global está equivocada, no es o nuclear o renovables. Hay que buscar formas de combinar ambas y cada país tendrá que decidir la proporción de cada una. Todos nuestros análisis muestran que las energías renovables funcionan mejor cuando la nuclear trabaja en paralelo.

P: *¿Qué otro avance tecnológico considera que pueda tener un impacto considerable?*

R: Creo que la mayor evolución de la energía nuclear estará en los cambios en las aplicaciones. Antes pensábamos únicamente en la generación de electricidad a gran escala y seguirá así, pero ahora evoluciona también a pequeña escala con nuevas aplicaciones; por ejemplo, para el transporte marítimo mercante, para reemplazar los combustibles fósiles, en procesos industriales, en producción de agua limpia... Este nuevo marco de avances es completamente diferente al que teníamos y supone un gran desafío tecnológico para los reguladores de todo el mundo.

P: *¿Cuáles son los principales desafíos que enfrenta la Agencia para los próximos cinco años?*

R: Creo que el mayor desafío que tendremos es el interés en la rápida expansión de la energía nuclear en todo el mundo, en sus distintos contextos. Muchos han cambiado sus políticas para una eliminación gradual de la energía nuclear y otros han decidido construir nuevas plantas en un tiempo muy limitado, lo que tendrá un gran impacto. Por ejemplo, hay países emergentes interesados en construir nuevas plantas nucleares, como Ghana, a donde viajé hace un par de meses, y muchos de nuestros miembros están interesados en ver cómo se desarrolla su programa nuclear desde cero. A la vez, contamos con países en los que ni siquiera se han planteado comenzar; es decir, en los que nunca se han construido centrales nucleares.

> *"Nuestros análisis muestran que las energías renovables funcionan mejor cuando la nuclear trabaja en paralelo"*

No creo que estemos en condiciones de abordar todos los problemas que existen. Tenemos que priorizar y encontrar formas de adaptarnos a este nuevo entorno siendo flexibles, pero también buscando recursos fuera de nuestro presupuesto normal para cumplir misiones. Hay miembros que nos necesitan y ese es un gran desafío; cómo conseguir recursos y personal, cómo proceder cuando nuestros miembros están estudiando el uso de la energía nuclear y cómo podemos ayudarles a cumplir sus objetivos, cada uno con su contexto y circunstancias.

P: *¿Cuáles han sido los momentos imprevistos y más difíciles que ha tenido que afrontar?*

R: Claramente, la guerra en Ucrania. Una guerra en el continente europeo es algo que nadie había previsto. Su impacto en la política energética mundial ha tenido aspectos tanto negativos como positivos. Un gran impacto en la agencia fue la suspensión de Rusia como miembro, lo que tiene una gran trascendencia en nuestro trabajo y nuestras comunicaciones con un país realmente importante en términos del tejido de empresas nucleares. Lo recuerdo como una gran perturbación y probablemente esté llevando a que el mundo sea diferente. Así que me atrevo a señalar que ese es el gran desafío que tuvimos que afrontar y aún hoy, dos años después, sigue siéndolo. Estamos trabajando para superarlo.

P: *¿Cómo le gustaría ser recordado cuando termine su mandato?*

R: Una cosa que he aprendido a lo largo de los años es que si te quedas sentado preocupado por tu legado, nunca lograrás nada. Así que no pienso en esto porque reconozco que no importa cuánto impacto tengas dos meses después de haberlo liderado. Para cualquiera que dirija una organización, su trabajo es dejarla mejor que cuando la encontró. Lo que quiero es poder mirar atrás y decir que dejé una organización más fuerte, relevante y flexible, con mejores servicios a sus miembros que los que encontré. Eso, para mí, es lo más importante.

HOSPITAL INFANTIL DE FILADELFIA

Emily Whitehead, primera paciente tratada con CAR-T y su oncólogo, Stephan Grupp.

CAR-T, una técnica basada en la modificación genética de células del propio paciente

Linfocitos armados contra el cáncer

En los últimos años se ha desarrollado una técnica para el tratamiento de ciertos cánceres que concentra terapia celular, inmunoterapia y terapia génica en un mismo proceso y supone un avance importante en este campo. Se denomina terapia CAR-T y se aplica actualmente frente a cánceres hematológicos. En concreto, está aprobada contra la leucemia linfoblástica aguda, el linfoma de células B y el mieloma múltiple. Es la única alternativa para aquellos pacientes que han recaído tras recibir quimioterapia e, incluso, trasplante de médula ósea. Los investigadores estudian ahora otras posibilidades, como utilizar estas terapias en primera línea de tratamiento, identificar nuevas dianas contra éstos y otros tipos de cáncer e incluso utilizarlo contra tumores sólidos. Varios proyectos que se están llevando a cabo en diferentes unidades de investigación de nuestro país intentan avanzar en esos objetivos.

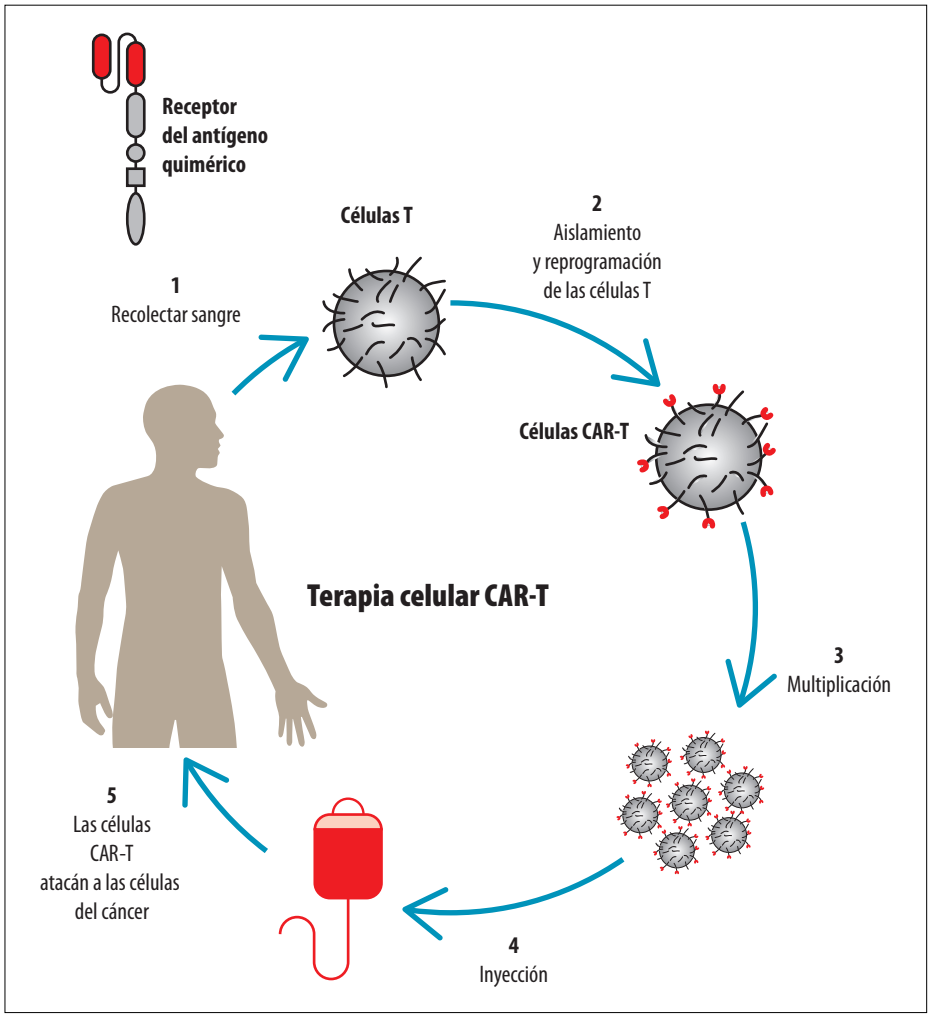
■ Texto: **Noemí Trabanco** | periodista de ciencia ■

Emily Whitehead fue la paciente número uno en el primer ensayo de terapia de células T con receptores quiméricos de antígenos (CAR-T, por sus siglas en inglés) contra la leucemia infantil. Tenía solo 6 años y tras una recaída sus posibilidades de supervivencia eran escasas. Casi 12 años después, Emily sigue libre de cáncer y la terapia CAR-T se ha convertido en un nuevo paradigma en el tratamiento del cáncer. El oncólogo Stephan Grupp, que lideró el ensayo en el Hospital de Niños de Filadelfia, en aquel momento en fase I, colaboraba estrechamente con el investigador Carl June, padre de esta tecnología. La Sociedad Americana de Oncología Clínica (ASCO) calificó la CAR-T como el Avance del Año en 2018.

Esta terapia se basa en la reprogramación genética de los linfocitos T del propio paciente, un tipo de glóbulo blanco cuya función es precisamente eliminar células infectadas y activar otros tipos celulares en la respuesta del organismo contra infecciones y otras enfermedades. A los linfocitos extraídos del paciente se les inserta un gen para que sean capaces de expresar una proteína en su membrana que funciona como receptor de otra proteína (antígeno) existente en las células cancerosas. Una vez reconocido este antígeno, los linfocitos son capaces de eliminarlas. Hasta el momento CAR-T se utiliza en el tratamiento del cáncer hematológico, que se produce en los tejidos a partir de los que se forma la sangre o en sus células inmunitarias.

La primera enfermedad para la que se demostró su eficacia fue la leucemia linfoblástica aguda (LLA) de tipo B, como la que presentaba Emily, donde la producción excesiva de linfocitos B inmaduros no permite la producción de leucocitos normales. Este tipo de leucemia es más común en niños y es el tipo de cáncer que más muertes provoca en menores de 15 años. "En España puede haber unos 300 casos al año, de los cuales no más de 30 o 40 necesitan acceder al CAR-T", explica el doctor Antonio Pérez, jefe del servicio de Hemato-Oncología pediátrica del Hospital Universitario La Paz de Madrid, que también lidera el Grupo de Investigación Traslacional en Cáncer Infantil, Trasplante Hematopoyético y Terapia Celular del Instituto de Investigación Sanitaria (IdiPAZ) del mismo hospital.

En el caso de la leucemia, y también del linfoma de tipo B, el antígeno contra el que se dirigen los linfocitos es el denominado CD19. Actualmente existen varios CAR-T producidos por la industria farmacéutica y aprobados en diferentes partes del mundo contra tres tipos de cáncer: LLA de tipo B, linfoma de tipo B en adultos y el mieloma múltiple (cáncer que se inicia en las células plasmáticas en la médula ósea). "La tecnología CAR-T ha evolucionado muy rápido a nivel de indicaciones médicas, pero en el caso de España, lo hace más lento a nivel de regulación, aunque en los últimos años el Ministerio ha comenzado a trabajar con más celeridad y se acaban de aprobar recientemente dos nuevas indicaciones", indica el doctor Pérez.



Antonio Pérez.

Este retraso ha supuesto que para algunos pacientes, especialmente adultos, fuese difícil acceder a este tipo de terapias. Actualmente la aplicación del tratamiento a través del Sistema Nacional de Salud (SNS) requiere de la aprobación de un comité evaluador y existen aún ciertas trabas burocráticas entre ésta y la aplicación del tratamiento. España cuenta hoy en día con más de 25 hospitales repartidos por todo el territorio, en los que se aplica esta terapia en adultos. Para cáncer infantil hay diez centros designados por el Ministerio. "A lo largo de estos años habremos tratado unos 500 pacientes para LLA, fundamentalmente niños", detalla Anto-

CAR-T académicos, una iniciativa española

España es el único país en el que los CAR-T académicos pueden llegar a utilizarse en pacientes sin haber sido llevados a la industria. Esto es ya una realidad para el CAR-T ARI-0001, desarrollado en el Hospital Clínic de Barcelona y en cuyo ensayo clínico estuvieron involucrados el hospital Clínic y el Sant Joan de Déu. Se convirtió en el primer CAR-T europeo autorizado para su uso en pacientes mayores de 25 años con leucemia linfoblástica aguda que no respondían a otros tratamientos. El ARI-0001 fue aprobado por la AEMPS en febrero de 2021 como un medicamento de terapia avanzada de fabricación no industrial, pudiéndose aplicar a pacientes a través de lo que se conoce como exención hospitalaria, y su coste es cubierto por el Sistema Nacional de Salud. En febrero de 2022 obtuvo también la designación PRIME de la Agencia Europea del Medicamento (EMA), desarrollada precisamente para medicamentos contra enfermedades para las que no existen otros tratamientos. Esto supone que la agencia priorizará la evaluación de esta terapia para aprobar su uso a nivel europeo.

Los CAR-T académicos permiten también abaratar el coste. Mientras que un CAR-T comercial puede costar entre 300 000 y 500 000 euros, un CAR-T académico ronda los 90 000. Esta fórmula se integra dentro del Plan de Abordaje de Terapias Avanzadas, desarrollado por el Ministerio de Sanidad para incorporarlo al Sistema Nacional de Salud, aprobado en noviembre de 2018. No obstante, "la aplicación de CAR académicos requiere de una infraestructura especializada, para ampliar la capacidad de su producción, como salas blancas y personal especializado", explica Joaquín Martínez.

nio Pérez, que también es el coordinador del Grupo de Terapias Avanzadas del Grupo Español de Trasplante Hematopoyético y Terapia Celular (GETH).

Hasta el pasado año, la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) había aprobado únicamente los CAR-T Kymriah y Yescarta, de las compañías farmacéuticas Novartis y Gilead, respectivamente. El pasado año se aprobaron también Tecartus (Gilead) y Abecma (Bristol Myers Squibb), este último contra mieloma múltiple, que muchos pacientes estaban esperando.

Hasta el momento, la terapia CAR-T se reserva para pacientes muy específicos, en los que se ha producido una recaída en una fase avanzada de la enfermedad. "Son pacientes que ya han recibido no una sino varias rondas de quimioterapia y algunos hasta dos y tres trasplantes de médula", explica el doctor Pérez. En muchos de estos casos se trata de un tratamiento definitivo. Según los datos disponibles hasta el momento, transcurridos dos años tras su aplicación, un 48-50 % de los pacientes con LLA tratados siguen libres de enfermedad. "Algunos pacientes que fueron tratados en los primeros ensayos siguen libres de cáncer tras diez años y mantienen la memoria inmunológica, como ocurre en el caso de Emily Whitehead.

Susana Rives.

Desgraciadamente no siempre es así y, en algunos casos, los CAR desaparecen al cabo de unos meses. Esto obliga a dar otro tratamiento para consolidar esa respuesta, como puede ser un trasplante", explica la doctora Susana Rives, jefa de la Unidad de Leucemias y Linfomas y de la Unidad CAR-T del Servicio de Hematología y Oncología Pediátrica del Hospital Sant Joan Déu, en Barcelona, donde han tratado a más de cien pacientes con esta terapia desde que llegara a España, entre ensayos clínicos y casos por indicación médica. En el linfoma este porcentaje es menor. "Aquí, no es tan importante que se mantenga esa memoria inmunológica, sino que las células T sean capaces de destruir al inicio, pero también existen casos en los que el tratamiento fracasa, alrededor de la mitad de los pacientes, bien porque no responden ya desde el inicio o bien porque recaen posteriormente. En estos casos aún no tenemos claro qué hacer después, pero ya es una mejoría con respecto a la quimioterapia o el trasplante, que no conseguía curar prácticamente a ningún paciente, y así podemos alargar el tiempo libre de enfermedad y mejorar la calidad de vida de algunos de ellos", añade Rives.

Para evaluar su eficacia en la curación "hay que tener en cuenta que esta terapia se inició en 2012, y a España no llegó hasta 2016. Necesitamos más tiempo de seguimiento de los pacientes para poder evaluar su capacidad de curación. En leucemia linfoblástica existe riesgo de recaída incluso tras 5 o 10 años. Necesitamos un poco más de recorrido", manifiesta Antonio Pérez, que añade "aun así, no debemos olvidar que ha-

blamos de pacientes para los que no había otra alternativa".

La investigación, indispensable

Las terapias CAR-T pueden ser el único recurso para aquellos pacientes en los que otros tratamientos no han funcionado, incluidos los actualmente disponibles. Son, afortunadamente, muy pocos casos, pero esto hace difícil que la industria farmacéutica ponga interés en ellos. La investigación académica es indispensable para desarrollar nuevos CAR que den respuesta a estos casos. Un ejemplo es la leucemia linfoblástica de tipo T. En este caso "los pacientes tienen bastantes más dificultades que en el caso de la B. Es una enfermedad aguda y muy agresiva. La mayoría de los casos se cura con quimioterapia y/o trasplante, pero existe un cierto grupo de pacientes en los que esto no es suficiente. Nosotros estamos trabajando para desarrollar un CAR-T contra esta enfermedad", explica Susana Rives.

Los denominados CAR-T académicos, desarrollados por grupos de investigación en hospitales y centros de investigación, requieren no obstante de una importante financiación, difícil de conseguir en muchos casos. Tanto la investigación preclínica como la realización de ensayos clínicos supone un coste muy elevado. "La financiación para la investigación académica viene fundamentalmente de las instituciones públicas, como la Agencia Estatal de Investigación o el Instituto de Salud Carlos III, pero también es fundamental el apoyo de fundaciones privadas. Un ejemplo fue el proyecto ARI, que dio a luz al CAR-T ARI-0001, desarrollado por el Hospital Clínic de Barcelona, o los proyectos que hemos llevado a cabo o que desarrollamos actualmente con la Fundación CRIS Contra el Cáncer", explica Antonio Pérez.

De esta fundación es director científico y patrón el médico e investigador Joaquín Martínez, jefe de Hematología del Hospital 12 de Octubre y jefe de la Unidad de Investigación Clínica de Tumores Hematológicos H12O-CNIO. "La fundación tiene ya casi 13 años de existencia. Su único objetivo es favorecer la investigación en cáncer y entre las acciones que promueve están las becas de excelencia para investigadores, ya sean clínicos o básicos", explica. Dentro de las convocatorias anuales, alrededor de un 30 % de los proyectos son para terapias avanzadas. Y también está financiando de forma sostenida unidades de investigación, como la del Hospital La Paz, dirigida por Antonio Pérez, o la nuestra, en el Hospital 12 de Octubre", añade. La fundación, está también presente en Inglaterra y Francia. En España ha financiado ya más de 20 millones de euros en investigación en cáncer durante estos años.

Desde que las terapias CAR-T comenzaron a aplicarse la investigación académica ha permitido a los especialistas aprender cómo seleccionar a aquellos pacientes para los que esta terapia puede ser más efectiva, así como a manejar los posibles efectos adversos que conlleva. "Durante la primera semana se genera lo que denominamos tormenta de citoquinas. Hemos aprendido a manejarla y, a día de hoy, la mortalidad relacionada con el tratamiento es muy baja, por debajo del 1-2 %", explica Antonio Pérez. Durante este tiempo "ha habido un gran desarrollo académico", añade el investigador, que actualmente busca mejorar las alternativas existentes y buscar otras aplicaciones.

Joaquín Martínez.

Nuevas estrategias

Entre los objetivos de los investigadores están encontrar nuevos CD19 que presenten ventajas terapéuticas con respecto a los ya existentes o evaluar la prescripción en fases previas de la enfermedad, así como identificar nuevas dianas contra las que enviar a los linfocitos, incluso para otros tipos de cáncer. "En nuestro hospital estamos involucrados, entre otros, en un ensayo a nivel internacional para evaluar el uso de Kymriah en primera línea de tratamiento en niños para los que sabemos que por sus características tienen mucho riesgo de recaer y de necesitar un trasplante de médula", explica Rives. El grupo de Antonio Pérez trabaja también en la utilización de CAR frente a tumores sólidos, en su caso el sarcoma, un tumor en el que se ha avanzado muy poco hasta ahora. "Aquí tenemos un CAR-T multidiana, que nos acaba de autorizar la AEMPS para realizar un ensayo clínico y para su producción. También estamos trabajando en distintos tipos de leucemias que denominamos huérfanas, por su baja incidencia y lo poco que se conoce sobre su tratamiento, o en las que, en lugar de células, los CAR sean partículas más pequeñas que tengan más facilidad para penetrar en tumores sólidos, menos efectos adversos y mayor efecto en la diana", indica.

El grupo liderado por Luis Álvarez-Vallina, jefe de la Unidad de Investigación Clínica en Inmunoterapia del Cáncer del CNIO y el Hospital 12 de Octubre, ha desarrollado durante estos años una alternativa a los CAR-T tra-

LA FDA analiza el desarrollo de tumores tras la terapia CAR-T

El pasado 28 de noviembre, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) hacía público un comunicado en el que informaba sobre la aparición de tumores en algunos pacientes que habían recibido terapia CAR-T, por lo que se disponía a evaluar estas informaciones para estudiar posibles acciones reguladoras.

"De momento hay descritos cuatro casos y hay más de 10 000 pacientes tratados en el mundo, por lo que la proporción es muy baja", explica la doctora Rives. En primer lugar, hay que evaluar si el tratamiento con CAR-T es realmente el causante de la aparición del cáncer. "No existen aún casos de pacientes tratados exclusivamente mediante terapia CAR-T, por lo que es pronto para poder asegurar esta relación", indica Antonio Pérez. Según los especialistas, esto tampoco es de extrañar y coinciden en que es función de las agencias reguladoras investigar estos casos.

Los pacientes que sobreviven a un cáncer tienen más riesgo de padecer un cáncer secundario. Además, en la modificación de los linfocitos T se utiliza un lentivirus para introducir el material genético en el ADN de los linfocitos. Esto conlleva un cierto riesgo de que se produzca una mutagénesis. "El riesgo es muy bajo y tenemos que tener en cuenta que son pacientes para los que no existe otra alternativa. El beneficio obtenido con esta terapia es siempre mayor que la posibilidad de desarrollar otro cáncer", dice Álvarez-Vallina.

Una alternativa en la que trabaja su grupo de investigación es la aplicación de la tecnología del ARN para la modificación de los linfocitos. "La idea es obtener moléculas de ARN sintético que codifican para el anticuerpo. Lo insertamos en las células del paciente mediante electroporación, evitando así la utilización de virus. La ventaja es, fundamentalmente, que no se integra en el genoma, con lo cual no existe ningún riesgo de mutagénesis", explica. Esta estrategia abarataría también los tratamientos, ya que la producción de estos ARN es menos costosa que la preparación de los virus utilizados actualmente.

dicionales: las células STAb-T. Se trata de combinar los CAR-T junto a lo que se conoce como anticuerpos biespecíficos, que son capaces de reconocer dos dianas diferentes. De esta forma reconocen tanto las células cancerosas como otras células T. En este tipo de inmunoterapia contra el cáncer, los anticuerpos se administran directamente al paciente. "Obteniendo células T con anticuerpos biespecíficos aumentamos la capacidad de penetración en los tumores, que en el caso del tratamiento con anticuerpos es más baja, y podemos reclutar más linfocitos T en la proximidad, cosa que no ocurre con las células CAR-T", explica el investigador. "A nivel preclínico, tanto in vitro como en modelos animales, hemos visto que esta estrategia potencia de forma muy importante la respuesta citotóxica", añade. Hasta el momento lo han demostrado para leucemias y linfomas tipo B y también para mieloma múltiple. "Pensamos que esta estrategia puede ser complementaria a la estrategia CAR-T", expone Álvarez-Vallina.

Su colega, el doctor Joaquín Martínez, con el que colabora en algunos proyectos, trabaja en otra alternativa a las células T. En su grupo tratan de utilizar otro tipo de células inmunes, los linfocitos NK (del inglés *natural killer*), que hasta el momento resultaban más difíciles de manipular en laboratorio, pero que podrían resultar más eficaces y menos tóxicos en el proceso. Otra de sus líneas de investigación es la de evaluar el impacto de la microbiota en este tipo de tratamientos. "Parece que actúan como moduladores del sistema inmune. Así, ciertos tipos de microorganismos o los compuestos que éstos producen pueden potenciar el efecto de estas terapias mientras que otros pueden perjudicarlo", explica Martínez. "Otra de las líneas de investigación en las que trabajamos es la de aplicar lo que denominamos CAR-T alogénicos, es decir, de donantes. Esto reduciría el tiempo del proceso y, además, no tenemos que obtener linfocitos de pacientes que se encuentran en un estado clínico susceptible". Estas y otras posibles aplicaciones apuntan a un papel fundamental de la terapia CAR-T en el tratamiento del cáncer, e incluso otras enfermedades.

Luis Álvarez-Vallina.

Un territorio amenazado por la contaminación, el turismo y el cambio climático

Nubarrones sobre la Antártida

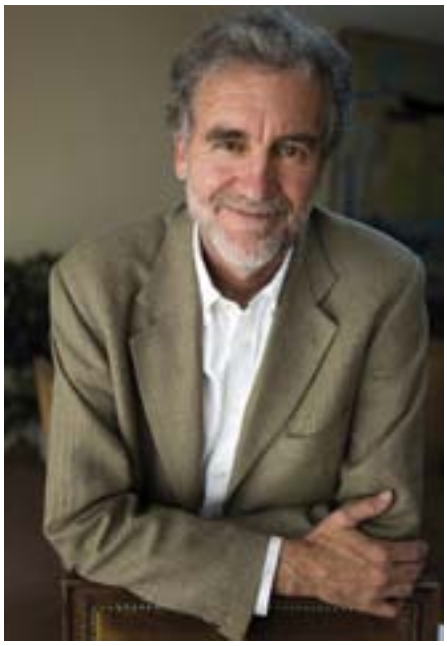
El continente helado, el más remoto y el de condiciones más extremas, fue declarado Reserva Natural para la Paz y la Ciencia en la Declaración de Madrid de 1991, para preservar su equilibrio natural al ser el territorio más virgen del planeta. Pero es también de una gran fragilidad y se ve ahora amenazado por factores exógenos. Si antaño fue el agujero de ozono la primera llamada de atención ahora está afectada por la contaminación, el turismo y el cambio climático. Si se altera el clima antártico más allá de cierto límite sus efectos repercutirán, como un búmeran, contra el resto del planeta, por su crucial papel en el clima global.

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | periodista de ciencia ■

La Antártida es un desconcierto. Un territorio mayor que todo el continente europeo, que se encuentra tan alejado y aislado del resto del mundo que hasta el siglo XIX permaneció ajeno a la huella humana. Un continente donde las condiciones climáticas son extremas: es el más frío, el más ventoso y el más seco del planeta. El único que no tiene un solo árbol; que, salvo minúsculas parcelas costeras de sus zonas más septentrionales, es pura nieve helada, acumulada hasta formar una capa de 2,5 kilómetros de espesor medio, que en algunas zonas llega casi al doble. Tanto hielo que supone más del 80 % del agua dulce de la Tierra. Un espacio sin dueños, gobernado por el Tratado Antártico y el Protocolo de Madrid, frutos de un gran consenso internacional.

Cada año, sus 13,5 millones de kilómetros cuadrados se duplican sobradamente cuando el mar se hiela. Es lo que se denomina banquisa, y su grosor varía entre unas zonas y otras, pero en su mayor parte resulta impenetrable para los barcos rompehielos durante su momento de mayor intensidad. Cada primavera antártica empieza a deshelarse y cada otoño reinicia su expansión, alcanzando su máximo a finales del invierno. Durante años la banquisa parecía no estar especialmente afectada por el cambio climático, pero ahora su extensión está disminuyendo. En 2023, según el National Snow and Ice Data Center estadounidense, la banquisa antártica alcanzó la menor extensión jamás registrada, 16,96 millones de km^2, más de un millón menos que el anterior récord desde que se realizan estas mediciones, iniciadas en 1979. Y en febrero de ese mismo año, durante el verano austral, también batió la otra marca contraria, la de menor extensión, con 4,23 millones de km^2.

"Es cierto que el deshielo está ocurriendo, de una forma más o menos acelerada, pero estos datos hay que mirarlos con cierta perspectiva. Hay que tener series largas para asegurarse de que lo que



Jerónimo López.

decimos es correcto. Además, esas cifras son un promedio, porque en unas zonas ha disminuido, pero en otras ha aumentado", dice Antonio Quesada, catedrático de fisiología vegetal de la Universidad Autónoma de Madrid y secretario general del Comité Polar Español.

La reducción de la banquisa es un síntoma fácil de detectar, gracias a la vigilancia de los satélites, pero hay otros problemas de deshielo que pueden ser mucho más graves y no son tan evidentes, como la lubricación de la base del hielo que se encuentra sobre el continente, especialmente en zonas costeras, por el aumento de las temperaturas y por infiltración de agua marina más cálida. Eso provoca que las lenguas glaciares se desplacen más rápidamente y se formen más icebergs. "Este fenómenos hace que se pierda mucho más hielo y al ser terrestre, no marino, puede provocar la subida del nivel del mar. Es un problema descubierto hace poco en el que se está trabajando mucho", añade Quesada.

Según Jerónimo López, profesor emérito de la Universidad Autónoma de Madrid e investigador antártico de larga trayectoria, es importante conseguir que el límite de subida de temperaturas en

Un delicado equilibrio internacional

El Tratado Antártico, firmado en 1959, y el Protocolo de Madrid sobre protección ambiental de la Antártida, de 1991, son los instrumentos de gobernanza del continente. Además, hay seis anexos sobre temas específicos. El Tratado puso en suspensión las reivindicaciones territoriales que mantenían siete países y declaró la Antártida como un territorio dedicado a la paz y la ciencia para el bien común de la humanidad. Según Sonia Ramos, "actualmente han firmado ambos acuerdos 56 países, aunque hay dos categorías: los miembros o partes consultivas, que tienen derecho a voz y voto y que actualmente son 29, entre ellos España; y los países que han firmado, pero aún no han ratificado, que pueden participar en las reuniones, pero sin voz ni voto". Para convertirse en miembro consultivo hay que demostrar el interés por la Antártida mediante actividades de investigación relevantes. "Antes era preceptivo disponer de una base, pero ahora se pretende limitar el número de ellas y se prefiere que colaboren con los países que ya disponen de bases mediante programas científicos", dice Ramos. Cada año se celebra la reunión consultiva, donde las partes países miembros toman las decisiones pertinentes, aunque para ello es necesario que haya unanimidad, lo que dificulta llevar a la práctica muchas propuestas.

Por su parte, la actividad científica está coordinada por el Scientific Committee on Antartic Research (SCAR), que en 2002 recibió el premio Príncipe de Asturias de Cooperación Internacional y que fue presidido por Jerónimo López entre 2012 y 2016. Las cuestiones relativas a la pesca están reguladas por la Convención para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA).

Sonia Ramos.

el planeta de 1,5 grados, aprobado en la COP de París, se mantenga. "Si se superan los dos grados, aunque parece muy poca diferencia, el comportamiento de los glaciares antárticos será problemático. Algunos modelos que llegan a los próximos dos o tres siglos indican que, si no se hace nada, el deshielo antártico podría hacer subir el nivel medio del mar unos 12 metros respecto a los valores del siglo XIX".

URBON

Las dos bases antárticas españolas, la Rey Juan Carlos I (arriba) y la Gabriel de Castilla.

Además, con el calentamiento aumenta también la acidez marina. "El océano es el gran sumidero de CO^2 y su acumulación aumenta el pH y eso se está detectando también en las aguas antárticas, donde hay organismos con caparazones calcáreos a los que está afectando", dice López, que este año está estudiando en las islas Shetland del Sur (donde se ubican las dos bases españolas) los sedimentos que decantan en zonas lacustres para conocer los cambios ambientales en ese entorno.

La contaminación

Comparado con lo que ocurre en los restantes continentes, la contaminación en la Antártida podría parecer un problema insignificante. La preocupación viene del hecho de que las cifras, aunque pequeñas, se incrementan año tras año y que aparecen regularmente nuevas sustancias. Continuamente se informa de la detección de microplásticos, compuestos orgánicos persistentes, metales pesados y otros productos; incluso de isótopos radiactivos, como el cloro-36, procedentes de las pruebas nucleares atmosféricas que las grandes potencias realizaron hasta finales del siglo XX.

En 2023, un grupo de investigación español encontró nicotina, antidepresivos, analgésicos y otros fármacos en muestras de agua dulce y marina, tanto en el entorno de bases antárticas como en zonas alejadas. Según Jerónimo López, que es uno de los coautores del estudio, "por su naturaleza, su persistencia y su capacidad de dispersión, estos contaminantes suponen una amenaza potencial para el medio ambiente antártico, especialmente en las áreas libres de hielo, de donde proceden la mayoría de las muestras estudiadas, por tratarse de ecosistemas frágiles y que contienen gran riqueza y diversidad biológica".

La presencia creciente de estos y otros contaminantes tiene orígenes diversos. En parte proceden por deposición, procedentes de otras partes del mundo y transportados por la dinámica atmosférica. Otros proceden de las actividades humanas *in situ,* tanto de las bases como de los turistas, a pesar de las precauciones que se toman para un correcto tratamiento de los residuos, tanto sólidos como líquidos. "El problema es que en las zonas polares se produce la llamada amplifica-

ción polar, porque se van acumulando los contaminantes y cuando llega el deshielo emergen en grandes cantidades. Hace un par de años se detectó que algunos animales antárticos tenían mayor concentración de mercurio que los de otras latitudes", dice Antonio Quesada.

La contaminación también permite entender la dinámica atmosférica terrestre. Según Quesada, "hasta los años 80, con el problema del agujero, no se pensaba en la Tierra como un todo interconectado. Los CFC, que producían el agujero, procedían sobre todo del hemisferio norte. Con la contaminación ocurre lo mismo, y recientemente hemos encontrado en huevos de pingüino contaminantes orgánicos que no existen en el hemisferio sur".

Precisamente, el problema del ozono está en vías de solución. La rápida adopción del Protocolo de Montreal, que prohibió el uso del los CFC en todo el mundo, ha permitido que se recupere al ritmo predicho por los modelos, que calculan que para 2050 se haya normalizado plenamente la capa de la estratosfera que nos protege de la radiación ultravioleta del sol.

Colonia de pingüinos emperador, especie que está siendo especialmente amenazada.

150 000 visitantes

La presencia humana, por mínima que pueda parecer, está en el origen de muchas de las amenazas. Y mientras que la de los científicos y personal de las bases permanece más o menos estable, crece enormemente la de los turistas. Si a mediados de los años 90 apenas llegaban unos 5 000 visitantes cada año, ahora las cifras superan los 100 000 y podría llegar pronto a los 150 000. Cifras muy alejadas de las que alcanza nuestro país, pero que se concentran en zonas muy concretas, las islas Shetland del Sur y la península antártica, y producen un impacto ambiental notable en unos ecosistemas frágiles y vírgenes hasta hace pocas décadas.

"Llevo 13 años asistiendo a las reuniones consultivas del Tratado Antártico y el turismo es siempre un punto importante de la agenda. En la reunión de 2023 se decidió crear un grupo de trabajo que tratar exclusivamente de buscar un marco normativo que regule el turismo mediante un sistema de gestión responsable y sostenible", dice Sonia Ramos, coordinadora del Comité Polar español. "No es solo que las cifras se incrementen sino también la diversificación de las actividades. Los operadores ofrecen cada vez más: más riesgo, más lejos, más flujo. Y antes eran grandes cruceros, con cientos o miles de turistas, que es más sencillo de gestionar, pero ahora lo que crece es el número de veleros y yates, con pequeños grupos y que no se ajustan a las indicaciones de la IAATO", añade.

La IAATO (International Association of Antartic Tour Operators) es una organización privada internacional, a la que pertenecen más de cien compañías y operadores turísticos antárticos y que promueve unas prácticas seguras y ambientalmente sostenibles por parte del sector. Sus representantes acuden como oyentes a las reuniones consultivas del Tratado y procuran atenerse a las decisiones que allí se toman. La adhesión a

Grupo de turistas visitando una pingüinera antártica.

Las ballenas son aún abundantes en aguas antárticas.

la organización es voluntaria, aunque, según Sonia Ramos, acoge en torno al 90 % de los operadores.

Adoptar un acuerdo de regulación del turismo será, en cualquier caso, un tarea complicada. "Para empezar, se habla siempre de regulación, no de limitación, que es un término que no aceptan algunos países, como Estados Unidos", explica Ramos. La reunión consultiva de este 2024 se celebrará en mayo en la India y tendrá una sesión especial de dos días de duración dedicada a analizar y debatir las conclusiones que presente el grupo de trabajo. "Se trata de adoptar alguna medida. Y digo medida porque el Tratado tiene tres instrumentos de gestión: medidas, resoluciones y decisiones, y las medidas son jurídicamente vinculantes, mientras que las resoluciones son recomendaciones y las decisiones son de aplicación interna del Tratado".

Especies amenazadas

Turistas, personal de las bases y alteraciones ambientales también están afectando a las especies antárticas. Algunas de ellas se ven amenazadas, aunque el riesgo de extinción es todavía reducido. "La reducción del mar helado y la presión humana están afectando a algunas poblaciones de pingüinos

El krill es una especie clave en la cadena trófica.

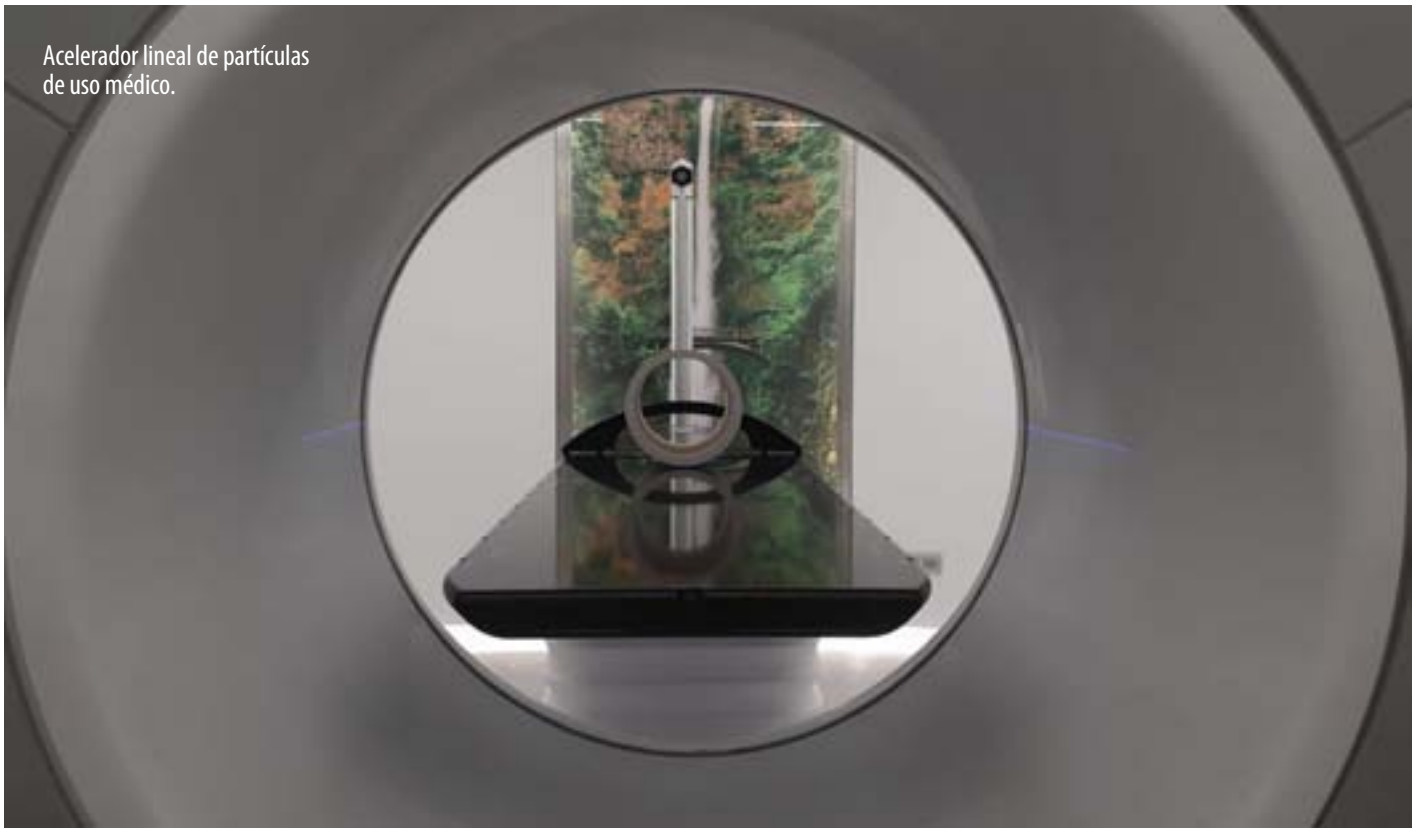
y también hay un problema de introducción de especies foráneas, especialmente a través de los buques, de procedencias variadas, Sudamérica, Suráfrica, Australia, Nueva Zelanda. Se trata sobre todo de microorganismos, que encuentran un hábitat con pocos competidores y de condiciones menos extremas que antes por el calentamiento", dice Jerónimo López.

Tradicionalmente, la presencia de patógenos en el continente era muy reducida, tanto por las temperaturas como por la falta de luz que se produce en latitudes altas durante meses, y también por el aislamiento. Pero el calentamiento terrestre y la presencia humana en las bases y, especialmente, el turismo, permite que poco a poco vayan introduciéndose. Uno de los casos más recientes y alarmantes ha sido la detección de variantes altamente patogénicas del virus de la gripe aviar en dos ejemplares muertos de skúa, una especie de págalo adaptado al ambiente antártico, en las proximidades de la base argentina Primavera. Y se sospecha que puedan haberse infectado también algunos mamíferos marinos.

Dentro de los pingüinos, Antonio Quesada destaca la situación del mayor y más emblemático, el emperador: "tiene un ciclo de vida muy complejo y el año pasado una colonia sufrió una gran mortandad, del orden del 40 %, porque una de las placas de hielo donde habitan y que es su zona de anidamiento, desapareció. Se ha propuesto declararlo especie protegida pero no ha habido consenso". Aunque toda la Antártida y sus habitantes está protegida, se trata de incluir los más vulnerables entre las listas de especies amenazadas, donde según Quesada, solo se encuentra la foca de Ross.

En las aguas antárticas también está ejerciendo una gran presión la pesca, una actividad creciente que supone ya un grave riesgo. Barcos de todo el mundo, con predominancia de los procedentes de China, realizan actividades extractivas que amenazan a numerosas especies. El caso más grave es el del krill, una especie de gamba que es la base de la cadena trófica general del continente por ser el alimento principal de ballenas y pingüinos, que está sufriendo los efectos de la sobrepesca, según han denunciado en febrero de este año diferentes ONG ambientales. Su presencia menguante puede provocar una reacción en cadena al privar de alimento a numerosas especies.

Los peligros que se ciernen sobre el territorio mejor conservado del planeta son muchas y aún no somos capaces de saber con certeza las consecuencias de su deterioro. Y es que, como dice Antonio Quesada, "la principal amenaza que hay sobre la Antártida es el desconocimiento. Lo que necesitamos es más ciencia, y cuanto más sepamos mayor capacidad de reacción y de gestión del continente tendremos".



Acelerador lineal de partículas de uso médico.

Lecciones aprendidas del desarrollo del Plan INVEAT

En 2021, el Gobierno de España aprobó la ejecución del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria (Plan INVEAT) en el Sistema Nacional de Salud, dotado con cerca de 800 millones de euros y gestionado por el Ministerio de Sanidad junto con las comunidades autónomas. Buena parte de los equipos con los que se ha dotado a instalaciones hospitalarias utilizan radiaciones ionizantes con fines diagnósticos y terapéuticos, por lo que el Consejo de Seguridad Nuclear, como organismo regulador en cuestiones de seguridad nuclear, protección radiológica y seguridad física, ha tenido que emitir los correspondientes informes previos a la concesión de las autorizaciones de funcionamiento por parte de los órganos ejecutivos correspondientes. El elevado número de equipos que contempla el Plan INVEAT ha supuesto un reto para el CSN por la elevada carga de trabajo que suponía, pero también ha servido para aprender lecciones aplicables a las diferentes fases que comprenden el régimen de autorización administrativa de las instalaciones radiactivas. Se analiza aquí el proceso llevado a cabo por la Subdirección de Protección Radiológica Operacional del CSN, los elementos más destacados de dicho proceso y los principales resultados obtenidos. ■ Texto: **Paula Muñoz, María Luisa Ramírez e Isabel Villanueva |** Subdirección de Protección Radiológica Operacional (SRO) ■

El Gobierno de España aprobó el 27 de abril de 2021 el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Dentro de las diez políticas tractoras que componen dicho plan se encuentra la número 6, dedicada al Pacto por la Ciencia y la Innovación, así como el refuerzo del Sistema Nacional de Salud, cuyo componente número 18 se orienta a la renovación y ampliación de sus capacidades.

Este componente busca reforzar dichas capacidades en coordinación con las comunidades autónomas (CC. AA.), fortalecer las debilidades estructurales detectadas y adaptar el Sistema Nacional de Salud a los retos y desafíos a los que se enfrenta. El objetivo es prepararlo para prevenir y afrontar posibles amenazas sanitarias globales y garantizar así que todas las personas tengan las máximas oportunidades para desarrollar y preservar su salud y que dispongan de un sistema sanitario público, universal y excelente,

sólidamente cohesionado, proactivo, innovador e inteligente y con perspectiva de género, que cuide y promocione la salud individual y colectiva a lo largo de toda la vida.

Una de las inversiones destacadas es el Plan en Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria (Plan INVEAT) en el Sistema Nacional de Salud, dotado con 796,1 millones de euros, que ha sido gestionado por el Ministerio de Sanidad junto con las CC.AA.

El plan aprobado consistió en la ampliación, sustitución o nueva instalación de equipos de alta tecnología tales como:

— Aceleradores lineales de partículas (LINAC)
— Equipos de braquiterapia de alta tasa (HDR)
— Equipos híbridos gammacámaras SPECT y tomografía computarizada (SPECT-TC)
— Equipos híbridos de tomografía por emisión de positrones y tomografía computarizada (PET-TC)

El calendario establecido para acometer este plan planteaba disponer de la instalación y puesta en marcha de los equipos en septiembre de 2023, como fecha límite, para poder de esta forma cumplir con el calendario acordado con la Comisión Europea (CE).

El CSN y el Plan INVEAT

El CSN, como organismo regulador en materia de protección radiológica, ha tenido una importante función en la ejecución del Plan INVEAT, que consistió en la emisión de informes previos a las resoluciones de autorización emitidas por los órganos ejecutivos competentes de las nuevas instalaciones, así como de las modificaciones de las instalaciones radiactivas medicas ya autorizadas.

El régimen de autorización administrativa para instalaciones radiactivas, conforme a la normativa vigente, es un proceso compuesto de varias fases, que se puede dividir en dos ejes fundamentales:

— Evaluación y emisión de informes relativos a la seguridad, protección radiológica y protección física previo a resolución de autorización (art 2b) de Ley 15/1980).
— Realización de visitas de inspección previas a la emisión de notificación de puesta en marcha. Inspección (art 39.3. de R.D.1836/1999 y art 2c) de Ley 15/1980).

De forma detallada, las funciones y actuaciones llevadas a cabo por el CSN en cada uno de los ejes anteriormente enunciados han sido:

A. Evaluación

Dentro de las funciones y competencias del Consejo de Seguridad Nuclear, que se establecen en la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del organismo, en el artículo 2b) se incluye la función de "emitir informes al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico relativos a la seguridad nuclear, protección radiológica y protección física previos a las resoluciones que este adopte en materia de concesión de autorizaciones para instalaciones nucleares y radiactivas /…/".

Así mismo, en el Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), en su capítulo I del título III define las instalaciones radiactivas de segunda categoría que requieren de autorización de funcionamiento o autorización de modificación.

Dentro de las mismas se encuentran las instalaciones de uso médico, que incluyen equipos generadores de radiación tales como: aceleradores lineales de partículas (LINAC), equipos SPECT-TC, y equipos PET- TC, así como equipos dotados de fuentes radiactivas, como los equipos de braquiterapia de alta tasa (HDR).

En este sentido, la consecución del objetivo estratégico establecido por el Ministerio de Sanidad a través del Plan INVEAT ha precisado de la concurrencia y colaboración del CSN para disponer, dentro del objetivo temporal del calendario establecido por España con la Comisión Europea, de los informes preceptivos relativos a seguridad y protección radiológica asociados al proceso de licenciamiento de las instalaciones radiactivas de tipo médico.

B. Inspección

Conforme a lo establecido en el artículo 39.3. del RINR, cuando la instalación esté en disposición de iniciar las operaciones, el titular lo comunicará al Consejo de Seguridad Nuclear, a fin de que este pueda realizar una visita de inspección. Por tanto, en las instalaciones radiactivas que precisaban inspección previa a la notificación de puesta en marcha, el CSN ha llevado a cabo esta función.

Una vez el CSN haya estimado que la instalación puede funcionar en condiciones de seguridad, emitirá una notificación para la puesta en marcha, que remitirá al titular, dando cuenta de esta al MITERD o al órgano ejecutivo competente en la comunidad autónoma correspondiente.

Es importante tener en cuenta que hasta que no se ha emitido la notificación de puesta en marcha el criterio del CSN es que ese equipo no es funcionante, es decir, no puede ser utilizado para diagnóstico o tratamiento con pacientes desde el punto de vista clínico.

Esta matización es interesante porque hay que tener en cuenta que algunos de estos equipos de alta tecnología antes de iniciar la operación desde el punto de vista clínico son puestos en funcionamiento para realizar las pruebas de aceptación y validación, puesta en servicio, calibración, control de calidad, etc., necesarias.

Esas pruebas son realizadas antes de disponer de la preceptiva notificación

Aceleradores lineales de electrones (LINAC)	Braquiterapia de alta tasa (HDR)	Tomografía por emisión de positrones (PET)	Tomografía por emisión de fotón único (SPECT CT)	Total
73	24	40	79	216

Gráfico 1. Equipos INVEAT evaluados por el CSN hasta 31 de diciembre de 2023.

	Aceleradores lineales de electrones (LINAC)	Braquiterapia de alta tasa (HDR)	Tomografía por emisión de positrones (PET)	Tomografía por emisión de fotón único (SPECT CT)	Total
Cataluña	11	4	6	12	33
País Vasco	3	1	1	3	8
Baleares	4	0	1	1	6

Gráfico 2. Equipos INVEAT tramitados por encomienda de funciones de comunidades autónomas.

Aceleradores lineales de electrones (LINAC)	Braquiterapia de alta tasa (HDR)	Tomografía por emisión de positrones (PET)	Tomografía por emisión de fotón único (SPECT CT)	Total
91	29	48	95	263

Gráfico 2B. Equipos INVEAT tramitados al Pleno del CSN para toma de decisión.

de puesta en marcha, por lo que, aunque se permite la emisión de radiación para la realización de las pruebas enunciadas anteriormente, no pueden ser utilizados desde el punto de vista clínico.

Número de equipos del Plan INVEAT tramitados por el CSN

En el grafico 1 se presenta una visión global del cómputo de equipos pertenecientes al Plan INVEAT cuya tramitación dentro del proceso de autorización ha sido realizada por el CSN hasta el 31 de diciembre de 2023. Estos equipos se disponen en centros hospitalarios pertenecientes al Sistema Nacional de Salud distribuidos en las diferentes comunidades autónomas.

Hay que tener en cuenta que el CSN dispone de encomiendas de funciones de evaluación e inspección en las comunidades autónomas de Cataluña, País Vasco y Baleares. Por tanto, los equipos pertenecientes a centros hospitalarios emplazados en estas comunidades autónomas no han sido evaluados por el CSN, sino por las encomiendas de funciones (ver gráfico 2).

En cuanto a la distribución del número de solicitudes de autorización recibidas para su tramitación en el CSN, pertenecientes al Plan INVEAT, en la tabla 1 se presentan distribuidas por comunidades autónomas. Se puede observar que el número de solicitudes recibidas para tramite dentro del Plan INVEAT es menor que el número equipos tramitados, dado que cada solicitud puede incluir varios equipos diferentes, por lo cual no se puede efectuar una relación lineal entre ambas variables.

Análisis

A continuación, se presentan los resultados de la actuación del CSN en cada una de las fases de tramitación administrativa de autorización ejercidas dentro del desarrollo del Plan INVEAT.

A. Evaluación

La estrategia utilizada por el CSN en el planeamiento de esta fase, que implicaba la evaluación y análisis de un número elevado de equipos de alta tecnología, incluyó el establecimiento de tres componentes orientados a agilizar el trámite asociado a esta fase de licenciamiento o autorización administrativa.

Los tres componentes de esta estrategia fueron:

— Elaboración de documentos guía para cada uno de los equipos objeto de autorización.
— Contratación de entidades externas para llevar a cabo una revisión independiente de las solicitudes.
— Elaboración de un protocolo de autorización de solicitudes incluidas dentro del Plan INVEAT correspondientes a los escenarios 2/3/4.

Los resultados del análisis de la utilización de cada uno de estos componentes de forma individual fueron los siguientes:

a. Elaboración de documentos guía para cada uno de los equipos objeto de autorización

El CSN identificó como elemento clave proporcionar apoyo a los titulares de las instalaciones radiactivas incluidas en el Plan INVEAT, con el objetivo de garantizar que la documentación de apoyo a la solicitud de autorización y objeto de evaluación por parte del CSN fuese completa, clara y precisa, evitando la necesidad de solicitar información adicional a los titulares de dichas instalaciones, aspecto que revertía en una optimización del tiempo en el proceso de evaluación, elemento crítico en este proyecto.

Para ello, el CSN elaboró un formato y contenido estándar de la documentación de apoyo a la solicitud de autorización para los diferentes equipos objeto de Plan INVEAT, que fueron remitidos a los titulares, servicios y unidades técnicas de protección radiológica, sociedades profesionales y autoridades competentes, mediante las siguientes circulares:

— Circular informativa nº 02/2022 sobre formato y contenido estándar de la solicitud de aceleradores lineales de electrones de uso médico.
— Circular informativa nº 03/2022 so-

Tabla 1. Solicitudes de autorización por comunidad autónoma

Comunidad autónoma	Número de solicitudes de autorización
Andalucía	28
Aragón	6
Asturias	2
Canarias	13
Cantabria	4
Castilla-La Mancha	8
Castilla y León	12
Comunidad Valenciana	16
Extremadura	4
Galicia	12
La Rioja	3
Madrid	22
Murcia	5
Navarra	2
Total	**137**

bre la documentación a presentar por los titulares para la autorización de instalaciones médicas con equipos de braquiterapia de alta tasa.

— Circular informativa nº 4/2022 sobre la documentación a presentar por los titulares para la autorización de instalaciones médicas con equipos híbridos PET-CT.
— Circular informativa nº 7/2022 sobre la documentación a presentar por los titulares para la autorización de instalaciones médicas con equipos híbridos SPECT-CT.

Todas estas circulares están disponibles en la página web institucional del CSN [(1)].

La retroalimentación de los grupos de interés sobre la utilidad de estos documentos ha sido en su mayoría muy positiva.

Los documentos guía han sido identificados como una herramienta fundamental no solo para la preparación de las solicitudes por parte de los titulares sino también para las entidades externas contratadas por el CSN en el desarrollo de este proyecto.

Esta estrategia de sistematización documental utilizada en la gestión de este proyecto ha permitido el fortalecimiento del servicio y atención a los regulados por parte del CSN.

El éxito en la acogida y utilidad de este tipo de documentos ha identificado la necesidad por parte del CSN de la elaboración sistemática de documentos guía para el licenciamiento de diferentes tipos de instalaciones radiactivas, utilizando un enfoque graduado. El CSN realizará un análisis proporcionado de los riesgos radiológicos asociados al tipo de instalación, dando prioridad al desarrollo de documentos guía para aquellas con mayor riesgo.

b. Contratación de entidades externas para llevar a cabo una revisión independiente de las solicitudes

El CSN llevó a cabo una licitación encaminada a la contratación de recursos externos de apoyo que realizaran una revisión independiente de las solicitudes presentadas por los titulares.

Esta práctica es asimilable a la establecida en la norma GSR Parte 3 del OIEA, sobre protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad. En este documento se establece en el requerimiento 13, de evaluación de la seguridad, en su apartado 3.34, que "los titulares de las licencias asegurarán que la evaluación de la seguridad esté documentada y, según convenga, que sea sometida a un examen independiente en el marco del sistema de gestión pertinente".

Esta revisión independiente inicial llevada a cabo por una entidad externa permite:

— Disponer de conocimiento sobre la calidad de la documentación presentada, por el solicitante.
— Comprobar el grado de completitud de la documentación presentada, de conformidad con lo establecido en el RINR y en los documentos guía, dependiendo del tipo de instalación y de la solicitud.
— Comprobar que el contenido de la documentación presentada por el solicitante es acorde a la normativa vigente en materia de protección radiológica y a los procedimientos de evaluación incluidos en el sistema de gestión del CSN.
— Identificar los aspectos no desarrollados adecuadamente en la documentación y que requerirán de solicitud de información adicional al solicitante.

Este ejercicio ha permitido agilizar el proceso de evaluación del organismo regulador, que no delega en ningún momento las funciones y competencias definidas en el artículo 2b) de la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del CSN, consistentes en la emisión de informes relativos a la seguridad nuclear, protección radiológica y protección física, preceptivos y previos a las resoluciones que adopte el MITERD o el órgano ejecutivo de la comunidad autónoma competente en materia de concesión de autorizaciones.

Con carácter mayoritario se ha identificado que el apoyo proporcionado por

estas entidades externas ha sido satisfactorio y útil en la consecución del objetivo final asociado a la finalización del proceso de evaluación en tiempo.

c. Elaboración de un protocolo de autorización de solicitudes incluidas dentro del Plan INVEAT correspondientes a escenarios 2/3/4

Por parte de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional (SRO) se elaboró un protocolo de autorización de las solicitudes incluidas dentro del Plan INVEAT. El espíritu de este documento es servir como guía sobre la sistemática a seguir por el personal técnico evaluador del CSN, orientada a la emisión de los informes preceptivos a los órganos ejecutivos de la Administración relativos a la concesión de autorizaciones de las instalaciones radiactivas contenidas en este plan.

En los formatos y contenido estándar de la documentación soporte se establecieron un conjunto de escenarios en función del tipo de solicitud presentada por el titular. Estos escenarios fueron:

— Escenario 1: instalaciones nuevas que solicitan autorización de funcionamiento y, por tanto, el contenido de la solicitud debe ceñirse de forma completa al contenido del documento guía editado por el CSN para el tipo de equipamiento correspondiente.
— Escenario 2: aumento del número de equipos con dependencias de nueva construcción en una instalación radiactiva que ya dispone de esos equipos.
— Escenario 3: sustitución de un equipo en una instalación radiactiva que precise cambios en el blindaje de la sala de exploración/tratamiento.
— Escenario 4: sustitución de equipo en una instalación radiactiva que no precise cambios en el blindaje de la sala de exploración/tratamiento.

Con la definición de estos escenarios se orientaba la evaluación a centrarse en el objeto de la solicitud mediante la aplicación de un enfoque graduado coherente con lo establecido en el requisito 3 apartado 2.3.1 del GSR Parte 3 del OIEA.

Con el avance del proyecto se observó la necesidad de actualizar y revisitar los criterios establecidos en dicho protocolo, en base a las lecciones aprendidas y experiencia adquirida, con el fin de clarificar, interpretar y reforzar la utilización del enfoque graduado.

Del análisis de la ejecución de la fase de evaluación de este proyecto se ha identificado que el segundo trimestre del año 2023 fue el momento más crítico, dado que el CSN identificó que el informe preceptivo en materia de seguridad y protección radiológica de aquellos equipos que iban a precisar visita de inspección previa a la emisión de notificación de puesta en marcha, debía ser emitido por el CSN al menos con tres meses de antelación a la fecha límite establecida por el Ministerio de Sanidad, fijada en septiembre de 2023. Esta presión, asociada al tiempo y actuación del CSN para poder cumplir con dichos objetivos, se puede observar en el gráfico 3, donde se

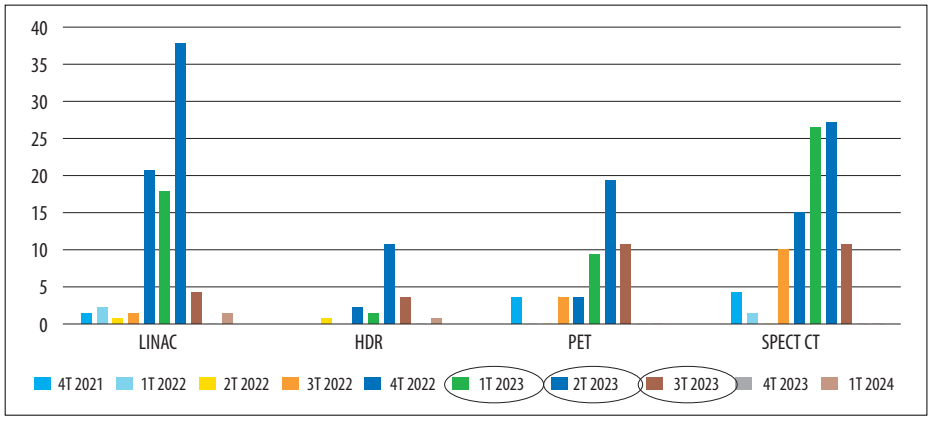


Gráfico 3. Número de expedientes tramitados al Pleno del CSN distribuidos por trimestre y tipo de equipo (años 2021 a 2024).

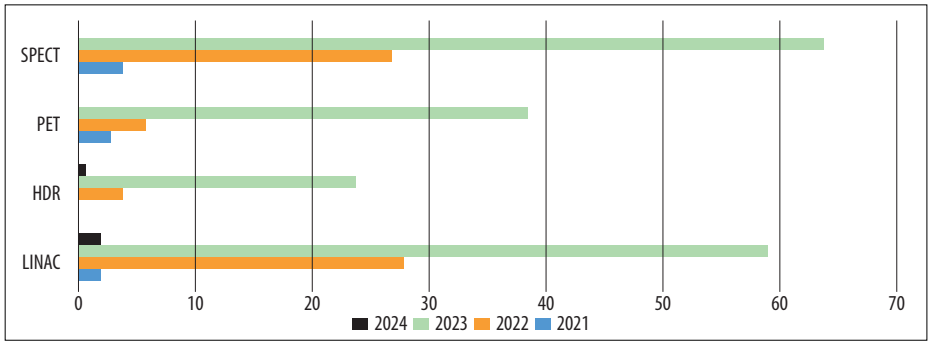


Gráfico 3B. Número de expedientes tramitados al Pleno del CSN distribuidos por el tipo de equipo y año.

	Aceleradores lineales de electrones (LINAC)	Braquiterapia de alta tasa (HDR)	Tomografía por emisión de positrones (PET)	Tomografía por emisión de fotón único (SPECT CT)
Tiempos medios de evaluación	**146 días**	**150 días**	**134 días**	**122 días**
Tiempos mínimos de evaluación	**36 días**	**63 días**	**26 días**	**24 días**

Gráfico 4. Tiempos medios y mínimos de evaluación.

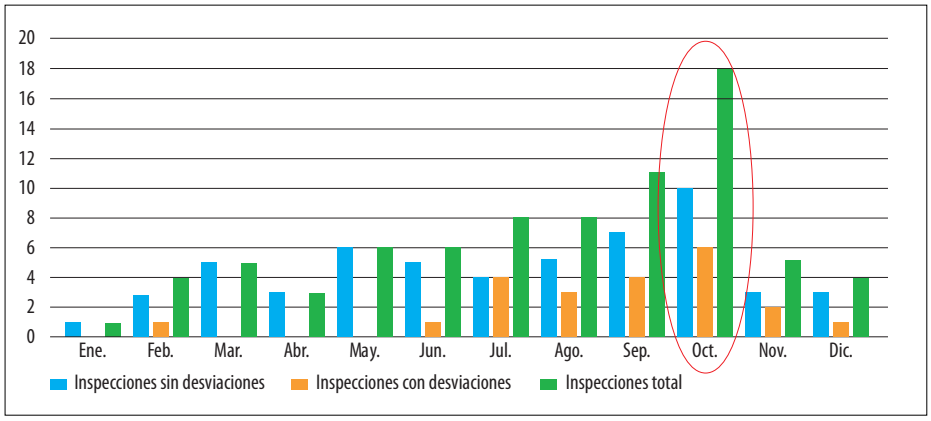


Gráfico 5. Inspecciones previas a la notificación de puesta en marcha.

presenta el número de expedientes tramitados al Pleno del CSN para la toma de decisiones, distribuidos por trimestres y tipo de equipo.

En dicho gráfico se observa claramente que el CSN priorizó en el primer semestre de 2023 la evaluación de los equipos que necesitaban inspección previa a la notificación de puesta en marcha, para que los titulares dispusieran de tiempo suficiente para realizar las pruebas de aceptación, continuando con los controles de calidad y puesta en servicio.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis de los tiempos medios y mínimos utilizados por el personal técnico evaluador para emitir IEV+PDT, considerando para este análisis el periodo comprendido desde el momento de recepción en el CSN de la solicitud de autorización hasta la toma de decisión por el Pleno del CSN, identificándose los datos en el gráfico 4.

Hay que enfatizar que en el análisis realizado se ha identificado una reducción significativa del tiempo de evaluación empleado por el CSN respecto al tiempo medio de evaluación utilizado antes del Plan INVEAT.

Si se analizan en detalle los datos presentados en la gráfica anterior se observa lo siguiente, en función del tipo de equipo:

— LINAC: Tiempo mínimo de alrededor de un mes. Reducción del 25 % del tiempo respecto al tiempo medio de evaluación antes del Plan INVEAT.
— HDR: tiempo mínimo de alrededor de dos meses. Reducción del 42 % del tiempo respecto al tiempo medio de evaluación antes del Plan INVEAT.
— PET: tiempo mínimo de alrededor de un mes. Reducción del 19 % del tiempo respecto al tiempo medio de evaluación antes del Plan INVEAT.
— SPECT-CT: tiempo mínimo de alrededor de un mes. Reducción del 20 % del tiempo respecto al tiempo medio de evaluación antes del Plan INVEAT.

Hay que poner en valor el extraordinario ejercicio y esfuerzo de optimización en los tiempos de evaluación llevado a cabo por el personal técnico evaluador de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional, todo ello sin reducción o minoración de la calidad del análisis efectuado de los criterios de seguridad y protección radiológica aplicables en cada caso.

Los componentes de la estrategia de optimización de la fase de evaluación puesta en práctica por el CSN han contribuido a un alineamiento por parte de los titulares del contenido de las solicitudes a los documentos guía publicados por el CSN para cada uno de los equipos, lo que ha minimizado o evitado la emisión de informes de petición de información adicional, reduciendo los tiempos de evaluación. Por otro lado, el compromiso y entrega del personal técnico evaluador en la búsqueda de soluciones y procesos optimizados, incluyendo la aplicación constante de un enfoque graduado, ha permitido cumplir con los tiempos de ejecución previstos en la planificación.

B. Evaluacion e inspeccion previa a la notificacion de puesta en marcha

La autorización de funcionamiento de la instalación radiactiva faculta a su titular para la construcción, adquisición del material o equipos radiactivos y montaje de la instalación, conforme a la reglamentación vigente y de acuerdo con unos límites y condiciones. Cuando la instalación está en disposición de iniciar las operaciones el titular debe comunicarlo al CSN, a fin de que este pueda realizar la inspección previa preceptiva. Una vez que el CSN estime que la instalación puede funcionar en condiciones de seguridad procederá a la emisión de la notificación para su puesta en marcha.

La estrategia utilizada en la gestión de este proyecto, como ya se ha identificado anteriormente, priorizó la evaluación de las solicitudes que requerirían de una inspección previa a la notificación de puesta en marcha. Una vez obtenida la correspondiente autorización de funcionamiento, el titular podía iniciar todos los trabajos de construcción y diseño y, con la empresa suministradora, la instalación y montaje del equipamiento, así como la realización de las pruebas de aceptación, continuando con los controles de calidad y puesta en servicio por parte de la unidad de radiofísica del centro hospitalario y la formación del personal, así como dar contestación a los requerimientos incluidos en la especificación técnica de funcionamiento (ETF) correspondiente, del dictamen técnico emitido por el CSN, y que deben presentar en el organismo regulador en el momento de solicitar la citada inspección para la fase de notificación de puesta en marcha. Esta planificación presuponía,

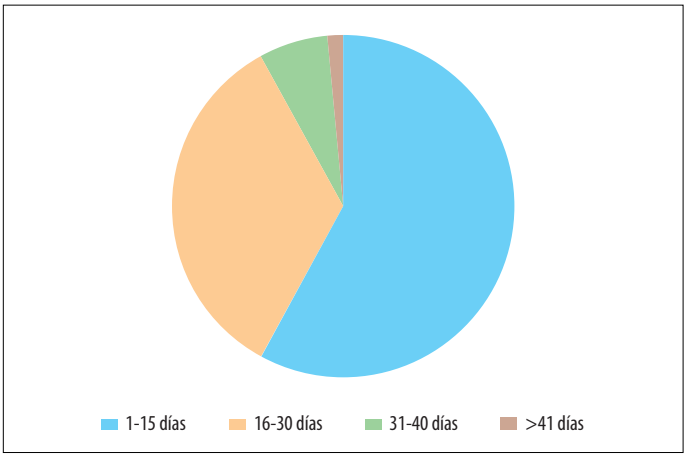


Gráfico 6. Tiempo transcurrido desde la solicitud de inspección y la inspección.

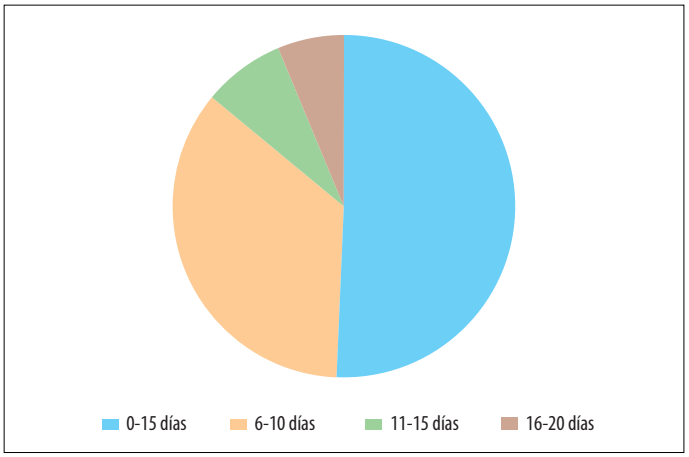


Gráfico 7. Tiempo transcurrido desde la inspección hasta el envío del acta de inspección.

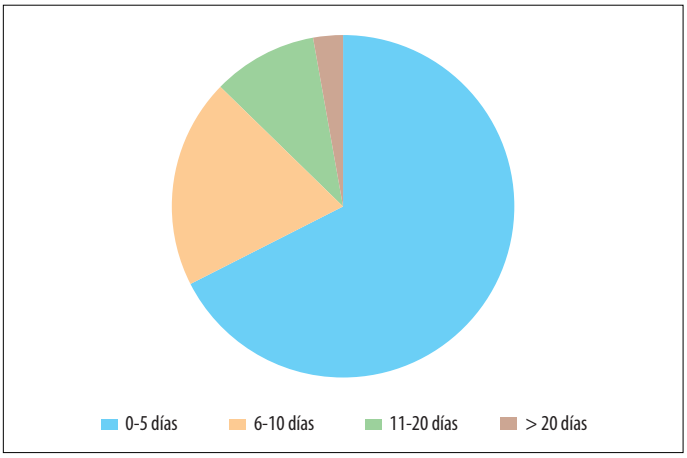


Gráfico 8. Tiempo transcurrido desde el envío del acta hasta su devolución por el titular.

en base a la experiencia existente en el CSN, que el titular precisaría normalmente de un periodo de tiempo aproximado de tres meses para poder completar dichos requerimientos.

Por otro lado, con el objetivo de planificar de forma escalonada y gradual y agilizar la ejecución de las visitas de inspecciones previas a la notificación de puesta en marcha, desde la Subdirección de Protección Radiológica Operacional se informó a los titulares de las instalaciones radiactivas, al Ministerio de Sanidad y a los representantes de las Consejerías de Sanidad de las comunidades autónomas que debían proceder a realizar la correspondiente solicitud al CSN una vez que dispusieran de las pruebas de aceptación de los equipos.

El CSN ha realizado desde enero hasta diciembre de 2023 un total de 79 inspecciones de notificación de puesta en marcha dentro del Plan INVEAT.

El análisis de la ejecución de esta fase del proyecto ha identificado que el momento de mayor presión se produjo en los meses de septiembre y octubre de 2023 (gráfico 5).

En cuanto a la actuación del CSN, como se observa en el gráfico 6, más del 60 % de las peticiones de inspección se han atendido dentro de los 15 días siguientes a su recepción y el 20 % en un mes. Los casos en los que ha transcurrido más de un mes se deben a que los titulares han solicitado la inspección sin estar todavía en disposición de iniciar su funcionamiento; por ejemplo, por no disponer todavía de un recinto blindado acondicionado para alojar el equipo al estar terminándose la ejecución de las obras.

También se han optimizado los tiempos empleados en el envío de las actas de inspección, como se observa en el gráfico 7, en el que se identifica que más del 50 % de las actas se enviaron dentro de los cinco días siguientes a la inspección.

Por otra parte, la respuesta de los titulares ha sido bastante satisfactoria, ya que el 60 % de ellos ha devuelto el trámite al acta dentro de los cinco días siguientes a su recepción. Se ha percibido la existencia por todas las partes involucradas de un compromiso e interés en alcanzar los objetivos previstos dentro del marco temporal establecido, como se observa en el gráfico 8.

A partir de la información presentada anteriormente se puede concluir que los plazos para gestionar esta fase de evaluación e inspección previa a la notificación de puesta en marcha se han minimizado o reducido al máximo posible, alcanzando niveles que se pueden calificar de excelentes.

Compromiso del CSN en la gestión del Plan INVEAT con los ODS de la agenda 2030

El Plan Estratégico del CSN para el periodo 2020-2025 establece una meta estratégica transversal de sostenibilidad que dispone que "toda la gestión del CSN está orientada hacia la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para 2030".

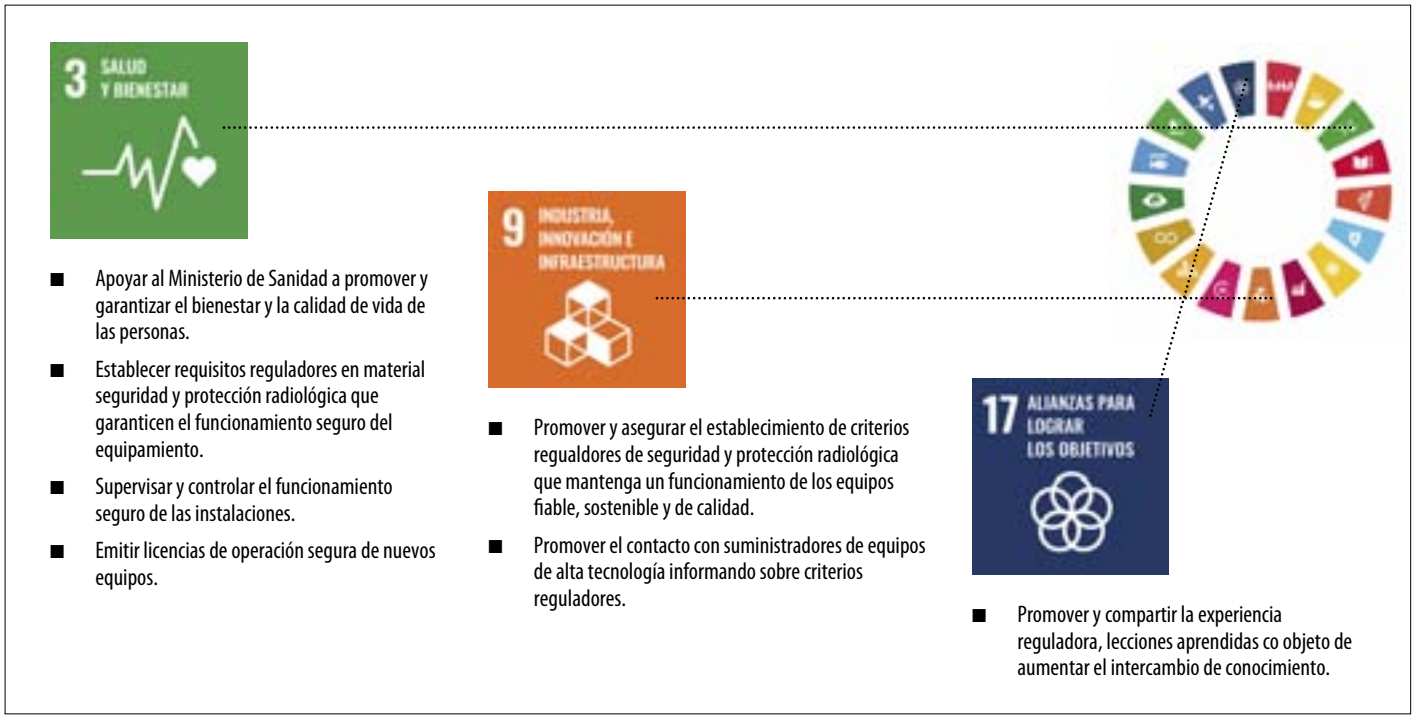


Gráfico 9. Cohesión entre las actividades realizadas por el CSN y los ODS de la Agenda 2030.

En ese sentido, en el estudio de lecciones aprendidas del Plan INVEAT se han analizado las actividades realizadas por el CSN, explorando su adhesión con los ODS de la Agenda 2030. El resultado de esta observancia ha identificado la cohesión con dichos objetivos, conforme a lo que se presenta en el gráfico 9.

Conclusiones

El CSN, a través de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional, ha realizado un análisis exhaustivo del desarrollo y lecciones aprendidas de la ejecución del Plan INVEAT. Estas lecciones son múltiples y diversas, de forma que la actuación del CSN sobre las áreas de mejora identificadas supondrá un avance en su eficiencia y eficacia reguladora.

El estudio ha revelado que el planeamiento de estrategias al inicio del proyecto por el CSN para su planificación y ejecución ha sido útil y ha resultado en una significativa optimización de los procesos, tanto de evaluación como de inspección.

Los resultados obtenidos de la evaluación han mostrado una alta satisfacción por parte de los regulados y grupos de interés en relación con la publicación de documentos guía para apoyo al proceso de elaboración y preparación de las solicitudes de autorización de las instalaciones radiactivas. Por ello, basándose en esos hallazgos, la Subdirección de Protección Radiológica Operacional va a extender la elaboración sistemática de documentos guía para el licenciamiento de diferentes tipos de instalaciones radiactivas, utilizando un enfoque graduado; es decir, dando prioridad al desarrollo de estos documentos para aquellas instalaciones de mayor riesgo radiológico.

Además, es destacable la optimización conseguida en reducción de tiempos, tanto en la fase de evaluación como en la fase de inspección, lo que evidencia el enorme compromiso y esfuerzo de todo el personal de la organización involucrado en este proyecto, tanto a nivel técnico como a nivel administrativo, para poder cumplir con los objetivos planteados.

En resumen, el Plan INVEAT ha sido un proyecto altamente demandante y desafiante para el CSN, que ha requerido de un elevado nivel de esfuerzo, compromiso y trabajo cooperativo por parte del personal involucrado. Ha generado impacto, por motivos de priorización en el marco de una estrategia global a nivel nacional, en la gestión de aquellas solicitudes de autorización remitidas al CSN no pertenecientes al Plan INVEAT, pero al tiempo se ha revelado como una herramienta de aprendizaje y evaluadora de las capacidades del propio organismo regulador, resultando en una experiencia enriquecedora, que ha incentivado la reflexión y búsqueda de mejores prácticas reguladoras y optimización de los procesos de trabajo.

(1) Acceso a las circulares informativas indicadas en la página 47.

Realidad virtual para entrenamiento en emergencias radiológicas

■ Texto: **Carlos León, Alejandro Villar, Pablo Gervás y Gonzalo Ménde** | Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid ■

Las emergencias radiológicas son aquellas que involucran fuentes radiactivas fuera del contexto de una central nuclear. Aunque estas emergencias tienen en general menor escala que las emergencias nucleares, comprenden un rango amplio de escenarios y una diversidad notable de procesos de intervención. En este tipo de emergencias se incluye desde un accidente de tráfico que involucre material radiactivo hasta una nube radiactiva procedente de un país extranjero.

Esta heterogeneidad de situaciones hace que la primera intervención sobre las emergencias radiológicas se vea llevada a cabo por equipos que muchas veces no tienen una formación avanzada en la identificación y la gestión de este tipo de situaciones. En ocasiones, los profesionales que se encuentran con la situación de emergencia tienen dificultad para identificar el riesgo real, lo cual puede conllevar que la actuación sea desmedida (por ejemplo, evacuar innecesariamente un edificio) o insuficiente (no distanciarse adecuadamente de la fuente).

El entrenamiento en gestión de emergencias radiológicas se realiza comúnmente con sesiones formativas de estudio y demostración de los protocolos de intervención y simulacros, y cada una de estas soluciones tiene ventajas e inconvenientes. Por un lado, las sesiones formativas tienen un coste relativamente reducido, pero su impacto en el aprendizaje es limitado porque no llegan a reproducir fielmente los detalles de la situación real. Por otro lado, los simulacros son efectivos y complejos, pero su coste de diseño, despliegue y evaluación es extremadamente alto y es muy difícil practicar simulacros con la cobertura y la frecuencia requeridas.

El proyecto de investigación ADARVE (Análisis de Datos de Realidad Virtual para formación en Emergencias Radiológicas) nace para ofrecer una alternativa que evite estos problemas. En ADARVE se ha creado un sistema completo de realidad virtual en el que profesionales que puedan enfrentarse a una situación de emergencia radiológica pueden experimentar situaciones simuladas y con distintas soluciones, aprendiendo los efectos de sus decisiones y pudiendo explorar e interactuar libremente.

Participante en el experimento piloto del sistema.

La realidad virtual permite crear experiencias inmersivas en las que la interacción con el entorno es mucho más cercana a las interacciones reales que las simulaciones basadas en dispositivos como teclados y pantallas. Moverse, coger y soltar objetos o mirar alrededor se lleva a cabo de manera casi idéntica a como se hace en el mundo real, y esto favorece la credibilidad y la concentración en el entorno que rodea a la persona que se está entrenando. Además, permite simular de forma precisa efectos físicos como la radiactividad, las lecturas de un dispositivo de medida o el tráfico de forma más fiel que en un simulacro, en el que ciertos aspectos tienen que ser aproximados por la seguridad de los participantes.

En cualquier caso, es importante tener en cuenta que el proyecto se contempla como una alternativa adicional a los procesos de aprendizaje ya existentes, y no como un reemplazo. Los simulacros y las sesiones específicas de formación y entrenamiento tienen un alto valor que puede ser complementado por la accesibilidad, adaptabilidad e inmediatez de los sistemas de realidad virtual.

En este contexto, el proyecto se plantea a partir de cuatro aspectos principales que pueden tener un impacto muy positivo sobre el entrenamiento de profesionales. En primer lugar, el coste de los procesos de aprendizaje es mucho más bajo que el de realizar un simulacro. Una vez diseñado e implementado un escenario de emergencia en el motor, puede ser experimentado un número virtualmente ilimitado de veces por distintos

Imagen de un escenario de los que aparecen en el desarrollo del entrenamiento.

profesionales. El relativo bajo coste de equipos de realidad virtual de consumo general hace fácilmente asequible el acceso a la plataforma de entrenamiento.

En segundo lugar, los escenarios son adaptables y configurables de forma sencilla a través de un editor gráfico. Así, es posible añadir más personas, elementos radiactivos o cambiar las particularidades de la fuente, por ejemplo. De esta manera, se pueden adaptar los ejercicios a distintos perfiles, y se pueden pulir interacciones fácilmente.

El tercer aspecto relevante del proyecto ADARVE es la actualización constante y el análisis de los datos. Durante cualquier sesión de entrenamiento, el sistema captura miles de datos relativos a las acciones y al estado de las personas involucradas, incluyendo una aproximación de su estado emocional. De esta manera, la información que se tiene del proceso de aprendizaje es muy elaborada y fiable. Todos estos datos permiten utilizar técnicas de análisis de datos para conocer la efectividad de un escenario, un proceso o el impacto de un problema concreto en un ejercicio.

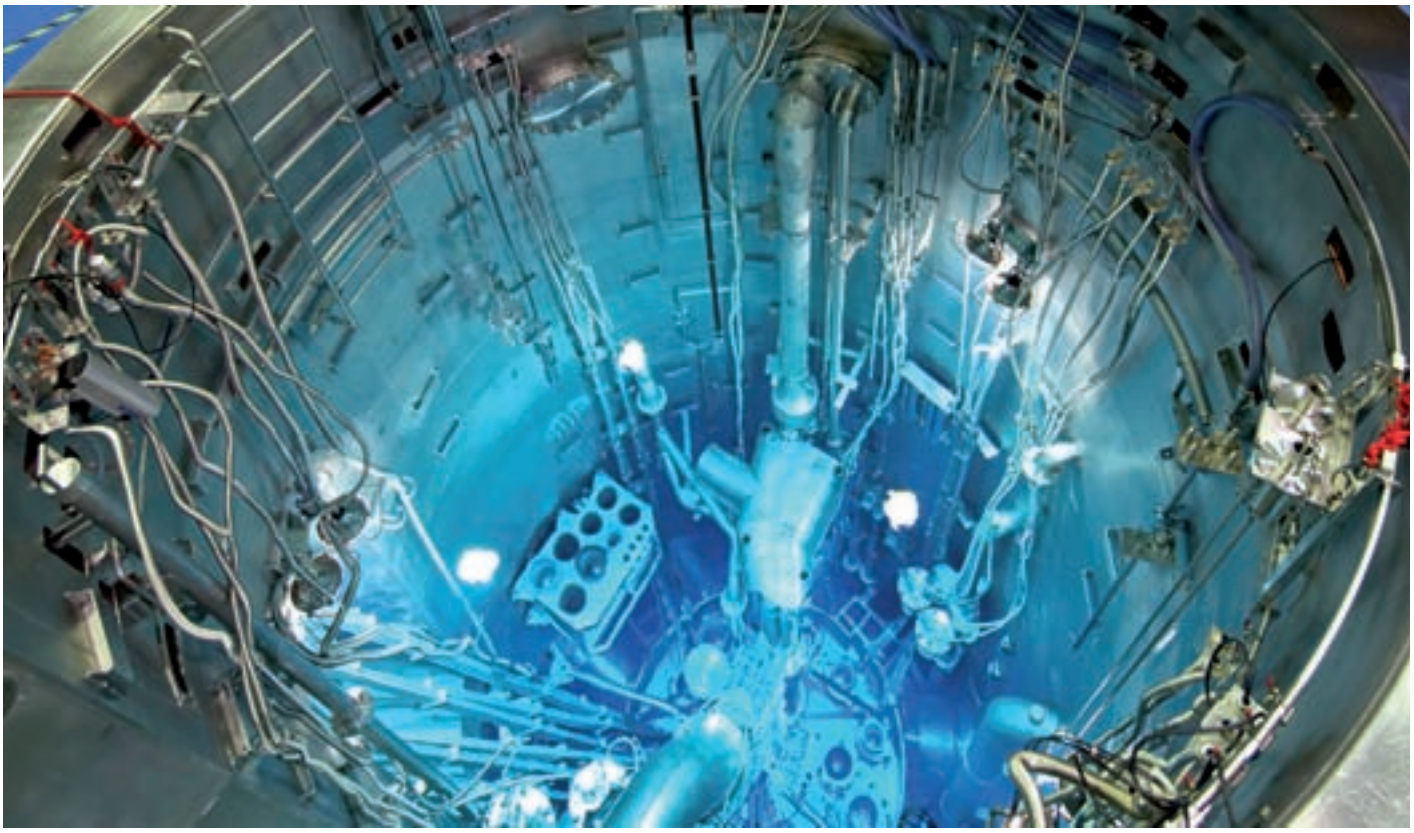
Finalmente, el cuarto punto principal del proyecto es el impacto en la calidad del aprendizaje. Los modelos de interacción, el diseño de escenarios, la presentación de información al usuario y las soluciones están basadas en varios estudios sobre aprendizaje con herramientas de realidad virtual. De esta forma, se espera que el proyecto tenga un impacto real y positivo en el aprendizaje.

A día de hoy, el proyecto se encuentra en un estado avanzado y ya se ha desplegado un sistema completo de realidad virtual y de edición de escenarios. El sistema cuenta con gafas de realidad virtual de gama alta, localizadores de posición y punto de vista y guantes hápticos. Además, es posible interactuar de forma multimodal con los escenarios, de forma que un usuario sin equipo de realidad virtual, pero con un ordenador, pueda también realizar los ejercicios.

Actualmente se han realizado varios experimentos piloto con profesionales en emergencias radiológicas (miembros del Cuerpo de Bomberos de Madrid y de la Unidad Militar de Emergencias) con resultados positivos, tanto desde el punto de vista de la toma de datos y la eficacia del aprendizaje como de la satisfacción de los profesionales con la herramienta. El siguiente paso en el proyecto es realizar experimentos de mayor escala con escenarios más complejos y comparar el aprendizaje adquirido con grupos experimentales que tengan formación de otro tipo como estudio de manuales o experiencia en simulacros. A través del análisis de los datos recogidos durante las simulaciones y comprobaciones de adquisición de conocimientos mediante otras pruebas, será posible confirmar la validez de la metodología y el sistema.

Se contempla, como trabajo futuro más allá de los objetivos establecidos en el proyecto ADARVE, una serie de posibles líneas de investigación. Por un lado, la gestión de situaciones de emergencia tiene componentes y pasos comunes, independientemente del riesgo concreto. Mediante la adaptación de escenarios, es posible crear un sistema de aprendizaje de gestión de riesgos de seguridad química, biológica, radiológica y nuclear (QBRN). La aplicación de los resultados del proyecto, además, puede ser mucho más amplia mediante la adaptación del sistema a dispositivos de realidad virtual de bajo coste e inalámbricos, de forma que sea accesible para diferentes intervinientes. Estos avances, unidos a los resultados y la sucesiva mejora de los escenarios, hacen posible el uso de la realidad virtual de forma generalizada para entrenamiento.

OIEA



El Plan de I+D+i del CSN permite al organismo mantener al día su capacidad técnica

Explorando las fronteras de la seguridad nuclear y radiológica

Para llevar a cabo su tarea como organismo regulador de la seguridad nuclear y radiológica en España, el Consejo de Seguridad Nuclear necesita mantener su capacidad técnica al máximo nivel e incrementarla con las aportaciones que desde la investigación científica y técnica se producen de manera regular en todo el mundo, en un ámbito tan complejo como el de su actuación. Para conseguir este objetivo, y teniendo en cuenta que no es una institución de investigación, participa en grandes proyectos nacionales e internacionales y dispone de un programa de ayudas a proyectos de I+D+i que financia los que mejores evaluaciones obtienen entre las que se presentan desde universidades, empresas y otros organismos.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | periodista de ciencia y medio ambiente ■

Ha pasado más de una década desde el último accidente nuclear de gravedad. El 11 de marzo de 2011, las olas de más de doce metros provocadas por un potente terremoto de magnitud 9,1 inundaron la central de Fukushima Daiichi, en Japón, produciendo fallos graves y la liberación de contaminación radiactiva. Desde entonces, el lento desmantelamiento de los reactores continúa en su fase inicial, la sombra del aumento de casos de cáncer de tiroides planea como una duda y 36 000 personas que fueron evacuadas todavía no han podido volver a sus casas.

También, desde entonces, países de todo el mundo analizan las circunstancias de sus centrales nucleares, para hacer frente a un posible accidente de este tipo. “Este incidente evidenció las carencias y la necesidad de mejorar la seguridad nuclear, un aspecto que el CSN aborda a

través de actividades de I+D+i", explica Carlos Castelao, jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento del Consejo. Castelao coordina el plan quinquenal de I+D+i del Consejo 2021-2025, que refleja "la firme determinación de aprender de la experiencia nacional e internacional y aplicar ese conocimiento en la evolución de nuestras propias capacidades regulatorias".

En el ámbito de la seguridad nuclear, el Consejo ha establecido una significativa participación en convenios internacionales, especialmente vinculados al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de Energía Nuclear (NEA) dependiente de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). También en colaboración con sus homólogos, como el organismo regulador estadounidense (USNRC), el alemán y el francés, entre otros. Así como con los principales suministradores de tecnología nuclear y los titulares de centrales nucleares de todo el mundo.

"Participar en convenios internacionales a países pequeños como España nos conviene muchísimo porque nosotros no podríamos financiar el coste de un proyecto", recuerda Carlos Castelao. Se refiere al hecho de que, en este tipo de acuerdos globales, todos los participantes realizan una aportación económica pero no a partes iguales, sino que se calcula en función de parámetros como el Producto Interior Bruto. "Aportando únicamente un 2 % del valor de todo el proyecto —frente al veintitantos que les corresponde a Japón o a EE. UU.— el CSN obtiene todos los resultados del proyectos que no podría sufragar por sí mismo", señala el experto.

Además, "estos acuerdos no solo promueven la colaboración entre naciones, sino que también permiten llevar a cabo proyectos cruciales para la evaluación de la seguridad en instalaciones nucleares", añade Miguel Sánchez, jefe del Área de Modelación y Simulación de la Subdirección General de Tecnología Nuclear del CSN.

Sánchez coordina CAMP (siglas de *Code Application and Maintenance Program*) uno de los programas internacionales más relevantes, que pretende mejorar los modelos predictivos del comportamiento de las centrales nucleares. Mediante instalaciones experimentales que emulan reactores concretos, se simulan escenarios de accidentes que pueden ocurrir con cierta frecuencia. También se evalúan los sistemas de seguridad y las actuaciones de los operadores en situaciones críticas, como la pérdida de energía eléctrica en la planta, que fue la causa de la catástrofe de Fukushima.

Miguel Sánchez.

Carlos Castelao.

Estos proyectos globales también le sirven al CSN para "compararse con otros países", señala Sánchez. Y la respuesta parece ser positiva, según subraya el experto: "los grupos de investigación de las universidades españolas, las ingenierías y nuestras centrales nucleares están a buen nivel".

Red nacional

El cableado eléctrico de una central nuclear es uno de los elementos más importantes en relación con su seguridad, pues de él depende que los sistemas funcionen. Sin embargo, como casi todo, envejece: el recubrimiento polimérico que lo recubre va perdiendo sus propiedades aislantes y debe ser renovado cada cierto tiempo. Su gran extensión, del orden de miles de kilómetros, hace que su sustitución no sea una cuestión baladí. Este tema es el que aborda uno de los convenios de investigación que el CSN ha llevado a cabo con las centrales nucleares españolas, que le ha permitido "definir de manera precisa las metas de investigación y acordar los ensayos necesarios, compartiendo costes y obteniendo resultados mutuamente beneficiosos", precisa Castelao.

La participación activa del Consejo no se limita solo a nivel internacional, sino que involucra a otras organizaciones nacionales. También, a través de convenios, el Consejo establece una red de colaboraciones con universidades y otros organismos españoles, como centrales nucleares y centros como el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). De manera conjunta "realizan experimentos que generan datos experimentales tangibles y medibles, que aportan robustez a las herramientas de cálculo, simulación y códigos analíticos utilizados en la evaluación de la seguridad de las centrales nucleares, con la esperanza de que su correcto funcionamiento en experimentos específicos se traduzca en eva-

Tabla 1. Proyectos I+D+i aprobados en la convocatoria del CSN de 2022

Solicitante	Proyecto
Universidad de Santiago de Compostela Facultad de Ciencias de la Comunicación	Radón en España: percepción de la opinión pública, agenda mediática y comunicación del riesgo (RAPAC).
Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Informática Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial	ADARVE (Análisis de Datos de Realidad Virtual para formación en Emergencias Radiológicas).
Universidad de Cantabria. Facultad de Medicina Departamento de Ciencias Médicas y Quirúrgicas	Materiales de construcción y radón.
Universidad Politécnica de Madrid. ETSI de Minas Departamento de Energía y Combustibles	Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible tolerante a accidentes (ATF).
Universidad de Huelva. Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Ciencias Integradas	Exhalación de Radón en materiales de construcción, impacto radiológico y medidas correctoras (EXRADÓN).
Universidad de Cantabria. Facultad de Medicina Departamento de Ciencias Médicas y Quirúrgicas	Karst y radón.
Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Institut de Tècniques Energètiques	Aplicación de la ICRP 137 Parte 3 a la evaluación de dosis por radón en lugares de trabajo con condiciones extremas (RADosis).
Universidad de Extremadura. Laboratorio de Radiactividad Ambiental	Regulación de la Evaluación del Impacto Radiológico Ambiental.
Universidad de Granada Oficina Técnica para la Implementación de IFMIF-DONES	Modelado de Escenarios Accidentales y Sistemas de Seguridad de la Instalación IFMIF-DONES para la definición de Requisitos de Confinamiento.
Universidad de Santiago de Compostela Instituto Gallego de Física de Altas Energías	EXHAMAT. Exhalación en materiales de construcción.
Universidad de Oviedo. Dpto. de Biología de Organismos y Sistemas	Exposición a radiación ionizante en anfibios: evaluación de marcos internacionales de protección radiológica (XENRAD).
Universidad Politécnica de Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos Departamento. de Materiales	Influencia de los defectos en el comportamiento de vainas ATF de Zr-Nb con revestimiento metálico (INDECOVA).
Universitat Politècnica de València Departamento de Ingeniería Química y Nuclear	Caracterización, exhalación y remediación de radón en materiales de construcción (EXRADON).
Universitat Politècnica de València. Dpto. de Ingeniería Química y Nuclear	Mejoras en las nuevas técnicas de inteligencia artificial para la detección de anomalías en reactores nucleares.
Universitat Politècnica de València I.U.I. de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)	CLPD-IA. Diseño Optimizado del Patrón de Carga del Núcleo de Reactores LWR Asistido por Inteligencia Artificial.

luaciones creíbles de la seguridad en las centrales nucleares nacionales en situaciones reales", señala Sánchez.

Más allá de los convenios

Aunque el convenio ha sido el instrumento más empleado históricamente por el CSN, el Consejo rescató en 2021 una fórmula de apoyo a la investigación que ya utilizaba antes de 2012: las subvenciones a entidades con el objetivo de impulsar proyectos innovadores y relevantes para el sector. El proceso es abierto y competitivo y se lleva a cabo mediante convocatorias anuales, como la correspondiente al año 2024, que se lanzará esta primavera. Además, las entidades privadas ahora también son elegibles para recibir subvenciones, un cambio implementado desde la convocatoria de 2023.

Uno de los temas estrella de las pasadas convocatorias es el radón, responsable de hasta el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud. También, hay mucho interés por ampliar el conocimiento sobre la contaminación radiológica de otros materiales de construcción que contienen radionúclidos que emiten radiación gamma.

Y aunque la mayoría de los proyectos no han concluido (porque, de media, suelen durar unos tres años), "los resultados esperados, que van desde la creación de herramientas informáticas hasta diseñar sistemas de medida mejorados, son cruciales para el CSN, pues ayudarán en su labor reguladora", explica Beatriz Robles, técnica del Área de Radiación Natural del CSN. El Consejo lleva muchos años trabajando en la protección radiológica frente a elementos como el radón, pero con el recién publicado Plan Nacional contra el Radón su labor se ha intensificado.

El reto de transferir el conocimiento

"Transferir el conocimiento y los resultados de proyectos de I+D+i a la regulación diaria es complejo y todo un reto", explica Carlos Castelao, jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento del CSN. Aunque el núcleo técnico del Consejo está fuertemente involucrado y es consciente de los resultados obtenidos, trasladar efectivamente estos conocimientos al conjunto de la organización plantea desafíos, reconoce el experto.

La comunicación interna se erige como un factor crítico en este sentido. "El objetivo primordial es conseguir que los diferentes departamentos absorban y apliquen los resultados obtenidos por los proyectos de investigación financiados en sus disposiciones, reglamentos y protocolos", añade Castelao.

Hay muchos más temas en el candelero, como es la irrupción de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial. En concreto, respecto a este tema, en la pasada convocatoria se abrió la puerta a explorar las posibles aplicaciones de la inteligencia artificial en la seguridad nuclear y la protección radiológica. Los resultados esperados podrían verterse en un documento estratégico en el que está ya trabajando el CSN.

Un componente esencial aborda la creciente amenaza de ciberseguridad en instalaciones nucleares. Las investigaciones trabajan en el fortalecimiento de las defensas digitales para proteger estas instalaciones críticas contra posibles amenazas cibernéticas, minimizando las vulnerabilidades y garantizando la integridad de las centrales.

Otro campo significativo es el de la gestión de residuos nucleares, que constituye uno de los desafíos más apremiantes de la energía nuclear. Algunas de las líneas de investigación abordan el desarrollo de soluciones sostenibles y seguras, con especial énfasis en el estudio de métodos de almacenamiento a largo plazo.

En la esfera de la seguridad radiológica, se pretende avanzar en la mejor protección contra la radiación tanto para los trabajadores de instalaciones nucleares y radiactivas como para el público en general. Este campo profundiza en el desarrollo de sistemas de monitorización más sofisticados y estrategias de mitigación más efectivas, propiciando entornos más seguros y reduciendo los riesgos asociados con la exposición a la radiación.

Beatriz Robles.

"La institución debe detectar y conocer las crecientes complejidades de la tecnología nuclear y los desafíos asociados para actualizar sus propias capacidades regulatorias, lo que impacta directamente en la seguridad nuclear en España", enfatiza Robles.

Las solicitudes de cada convocatoria son evaluadas conforme a los criterios establecidos en las bases de esta. Se valora la capacidad del equipo investigador y la complementariedad de los equipos participantes; se analiza si va a suponer realmente una contribución científico-técnica relevante y su previsible impacto sobre el incremento de la seguridad nuclear o de la protección radiológica. Además, a partir de la anterior convocatoria, la de 2023, se introdujo como novedad valorar que la entidad disponga de un plan de igualdad, explica Castelao, que además es secretario de la comisión de valoración de los proyectos. También se evalúa que la propuesta disponga de un plan de comunicación, información y difusión de resultados. "La divulgación de conocimiento a través de publicaciones y presentaciones en congresos contribuye a la transferencia de información y beneficia a otros organismos y universidades interesados en el tema", añade Robles.

Como enfatiza Sánchez, "las inversiones en I+D+i del CSN mejoran el país porque ayudan a que algunos estudiantes puedan realizar sus tesis doctorales, a que la industria haga las cosas mejor y a que las centrales funcionen de manera óptima y más segura. También contribuyen a engrosar la cantera de expertos, que mejoran su capacidad de interpretar y de seguir las disposiciones del Consejo".

A pesar de los desafíos y obstáculos inherentes, "el CSN demuestra ser una pieza clave en el desarrollo científico y la regulación nuclear en España. Su enfoque estratégico, marcado por la colaboración nacional e internacional, subraya la importancia de la investigación y el desarrollo continuo para abordar los desafíos en el ámbito nuclear", concluye Castelao. En un panorama global, donde la seguridad y la innovación son imperativos, el CSN tiene la ambición de posicionarse como un actor crucial en la búsqueda de soluciones y la aplicación efectiva de conocimientos para garantizar un futuro nuclear y radiológico seguro y sostenible.

Irene Joliot-Curie y Frèdèrick Joliot en su laboratorio, en 1945

La hija de Pierre y Marie también ganó el Nobel de Química en 1935

Irene Joliot-Curie y la radiactividad artificial

Irene Curie nació en 1897, hija de Pierre y Marie Curie, dos de las personalidades más importantes y decisivas del mundo de la ciencia. Irene, licenciada en física y matemáticas, trabajó junto a su madre en el suministro de unidades móviles de rayos X durante la Primera Guerra Mundial y, posteriormente, en el centro que habían fundado sus padres, el Instituto del Radio. Allí, sola o en colaboración con su marido, el físico Frédéric Joliot, llevó a cabo investigaciones en el campo de la radiactividad natural y artificial, la transmutación de los elementos y la física nuclear. En 1934, el matrimonio consiguió por primera vez en la historia producir artificialmente elementos radiactivos, investigación por la que fueron galardonados con el Premio Nobel de Química en 1935.

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

De izquierda a derecha, Marie Curie, Irene Joliot-Curie, sus hijos, Frédéric Joliot, y la señora Joliot.

SOCIETE FRANCAISE DE PHYSIQUE, PARIS

Irene y Marie Curie en 1925.

Irene Curie y Marie Curie enseñando al Cuerpo Expedicionario Americano en el Instituto del Radio, en 1919.

Irene Curie nació el 12 de septiembre de 1897 en la que pronto se convertiría en la Familia Real de la ciencia. Marie y Pierre Curie ganaron el Premio Nobel de Física en 1903 y Marie ganaría, además, el de Química en 1911. En su libro, La vida heroica de Marie Curie, Eva, su hermana, habla de Irene como "una niña tranquila y brava", profundamente parecida a su padre, que desde muy joven destacó en matemáticas y física. La infancia de las dos hermanas cambió por completo la mañana del 19 de abril de 1906. Irene tenía ocho años y Eva cerca de dos, cuando su padre fue atropellado por un carruaje tirado por caballos en la calle Dauphine, cerca de Saint Germain de Pres, en París.

La familia apesadumbrada se mudó una nueva casa en la ciudad con el suegro de Marie, el doctor Curie, que se convertiría en el compañero de juegos de las niñas, su maestro, sobre todo para Irene, a quien orientó en su vida intelectual de una manera decisiva. Su abuelo la instruyó en historia natural, botánica, literatura y en su entusiasmo por Víctor Hugo. "El equilibrio moral de la actual Irene Joliot-Curie", escribió Eva, "su espanto al dolor, su adhesión implacable a lo real, su anticlericalismo, sus ideas políticas, las heredó, en línea recta, de su abuelo".

Con Marie, las hermanas dan largos paseos a pie y hacen ejercicio físico en su jardín, y en vacaciones montan en bicicleta, hacen alpinismo, aprenden a montar a caballo... "No quiere Maríe que sus hijas se lancen a las aventuras acrobáticas o las imprudencias, pero las quiere decididas. No se les hará nunca miedo en la oscuridad, no se las dejará meter la cabeza bajo la almohada cuando haya tempestad; no se las hará temer ni a los ladrones ni a las epidemias... A los once o doce años las niñas saldrán solas y más tarde viajarán sin escolta", escribe Eva. Excelentes deportistas, Marie procura evitar a sus hijas

Irene Joliot-Curie (sentada), Maurice Surdin y Francis Perrin en un panel de control del primer reactor nuclear francés, en 1949.

Irene Curie, enfermera de la Cruz Roja delante de su tienda en Hoogstade. Bélgica, 1915.

© ASSOCIATION CURIE JOLIOT-CURIE

© ASSOCIATION CURIE JOLIOT-CURIE

Irene Joliot-Curie en la unidad de radilogía de Amiens, en 1916.

"los sueños nostálgicos y sentimentales, los excesos de sensibilidad" y toma la decisión de no hablarles jamás de su padre. Aunque enseña a sus hijas el polaco, quiere hacer de ellas dos "auténticas francesas", que no sufran por su patria como lo hizo ella.

Hacia 1907 Irene empieza a estudiar en una cooperativa de enseñanza creada por Marie con colegas y amigos de la Sorbona para enseñar a sus hijos: Jean Perrin imparte clases de química, el físico Paul Langevin de matemáticas, Marie de física, charlan con el escultor Jean Marie Joseph Magrou… De esta etapa, Irene desarrollaría el gusto por el trabajo, cierta indiferencia por el dinero y, según Eva, "un instinto de independencia que nos daba la convicción de que en cualquier circunstancia sabríamos, sin ninguna ayuda, salir de apuros". Dos años después acaba el programa, en parte por agotamiento de los profesores y en parte para que el grupo de estudiantes puedan dedicarse a preparar los programas oficiales, y Marie matricula a Irene en el colegio Sévigné, una escuela privada en el centro de París, donde finaliza los estudios de secundaria.

En octubre de 1914, pocos meses después de estallar la Primera Guerra Mundial, Irene ingresa en la Facultad de Ciencias de la Sorbona para estudiar física y matemáticas, pero dos años después, en 1916, con diecisiete años, acaba participando en el conflicto bélico. Junto a su madre, Irene se une al servicio de radiología en el ejército con las llamadas *petites curies,* ambulancias radiológicas para diagnóstico con rayos X de los soldados heridos en el frente. También colaboró en la formación del personal médico y militar en las nuevas técnicas radiológicas en hospitales de Francia y Bélgica.

Acabada por fin la guerra, Irene se licencia en 1920 con matrícula de honor en la Sorbona y empieza a trabajar en

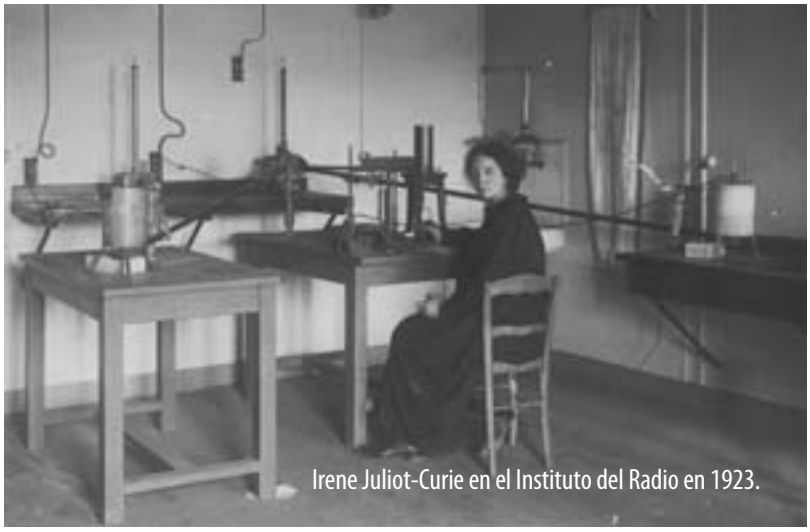
Radiactividad natural *vs* radiactividad artificial

Radiactividad natural

Existen tres series radiactivas naturales, es decir, que se producen espontáneamente, entre los elementos de la tabla periódica. Se denominan serie del uranio, serie del actinio y serie del torio, cada una de ellas con el nombre del elemento en el que comienza la serie (excepto la serie del actinio, que comienza con un isótopo diferente del uranio). Cada serie decae a través de una serie de núcleos inestables mediante emisión alfa y beta y cada serie termina en un isótopo estable diferente del plomo.

Radiactividad artificial

No todas las reacciones nucleares son espontáneas. La reactividad artificial ocurre cuando isótopos estables son bombardeados con partículas, como neutrones o rayos alfa. Este método de inducir una reacción nuclear se denomina radiactividad artificial. Desde que el matrimonio Joliot-Curie sintetizara los primeros elementos radioactivos artificiales se han fabricado artificialmente una serie de nuevos elementos con números atómicos superiores a 92 (el número atómico del elemento natural más pesado, el uranio). Los miembros de esta familia se denominan elementos transuránicos. ◗



Irene Juliot-Curie en el Instituto del Radio en 1923.

Irene Joliot-Curie y Frédéric Joliot en su laboratorio en 1935.

el Instituto del Radio, que posteriormente pasará a llamarse Instituto Curie, como ayudante de su madre. En el libro "Marie Curie and Her Daughters: The Private Lives of Science's First Family" ("Marie Curie y sus hijas: la vida privada de la primera familia de la ciencia") la periodista estadounidense Shelley Emling cuenta que Irene observó a su madre muy de cerca, desde que era una niña y, por supuesto, durante el tiempo que trabajaron juntas, lo que despertó una gran admiración hacia ella. Las dos eran mujeres parecidas, reservadas, estudiosas, sin gran interés por la vida social.

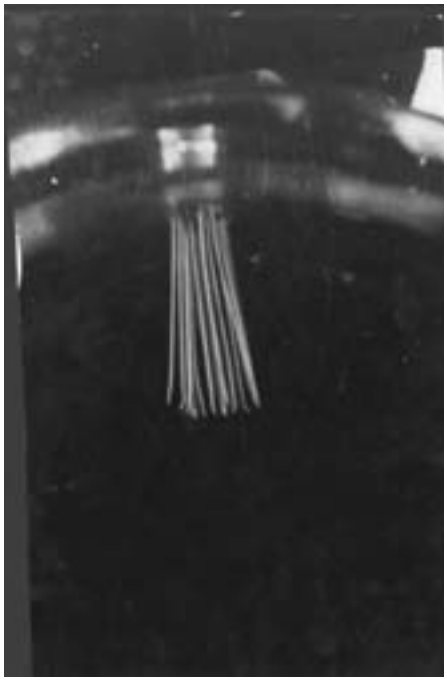
En 1925, Irene se doctoró con una tesis bajo el título "Recherches sur les rayons alfa du polonium, oscillation de parcours, vitesse d'émission, pouvoir ionisant" ("Investigación sobre los rayos alfa del polonio, oscilación de rumbo, velocidad de emisión, poder ionizante") que versaba sobre la emisión de partículas alfa (núcleos de helio-4) por una fuente de polonio. Un año después se casa con el asistente personal de su madre, el físico Frédéric Joliot, y adopta el apellido conjunto Joliot-Curie. En 1927 tienen una hija, Helene, y cinco años más tarde un hijo, Pierre. Ambos se dedicarían también a la ciencia.

Marie dirigió el Instituto del Radio hasta 1934, año en que pasa a dirigirlo André Debernie hasta 1946, cuando Irene asumió la dirección del centro que fundó su madre. Tras su muerte, en 1956, le sucedió su marido Frédéric. A partir de 1958, los directores posteriores decidieron preservar inalterado este laboratorio mítico que en la actualidad forma parte del Museo Curie.

Descubrimientos

Desde el Instituto del Radio, Irene y su esposo, Frédéric Joliot, se embarcan en una colaboración científica, que en cierto modo se parece a la que empren-

Fotografía realizada por Irene Joliot-Curie y Frédéric Joliot, de un grupo de rayos alfa de Polonio.



GETTY IMAGES

Irene Joliot-Curie y Albert Einstein en el porche trasero de la casa de este en Princeton. Nueva Jersey, 20 de marzo de 1948.

dieron Marie y Pierre, y que también tendría consecuencias fundamentales en la historia de la física nuclear. En aquellos años, la radiación subatómica procedente de las sustancias radiactivas se estaba convirtiendo en una herramienta importante para investigar la intimidad silenciosa de las sustancias químicas. En 1934, la pareja Joliot-Curie llevó a cabo un experimento innovador: bombardearon una fina pieza de aluminio con partículas alfa. Estas partículas son núcleos de átomos de helio-4, formados por dos neutrones y dos protones, y su masa es relativamente grande, por lo que no penetran mucho en la sustancia contra la que se irradian. Sin embargo, su capacidad de ionizarla es muy elevada.

El matrimonio descubrió que tras bombardear con ellas esta placa fina de aluminio, éste emitía una radiación, que quedaba recogida en el interior de un aparato conocido como cámara de nubes, y que esta radiación continuaba incluso después de retirar la fuente. Esto significaba que los átomos de aluminio estables se habían tenido que convertir en otro elemento radiactivo, concretamente en un isótopo radiactivo del fósforo. Repitieron el experimento con átomos de boro y magnesio y publicaron el artículo "Production artificielle d'éléments radioactifs. Preuve chimique de la transmutation des éléments" (Producción artificial de elementos radiactivos. Prueba química de la transmutación de los elementos). Las implicaciones eran enormes: por primera vez en la historia, se habían creado elementos radiactivos de forma artificial, marcando el nacimiento de una nueva disciplina: la radiactividad artificial.

Este logro revolucionó la comprensión de la estructura atómica, pero además cambió la forma de ver los elementos químicos y las relaciones entre ellos, incluyendo los fenómenos de fisión de núcleos pesados en otros más ligeros o la fusión de núcleos ligeros para formar núcleos más pesados, lo que abrió nuevas perspectivas para la investigación en física nuclear. En 1935, Irene y Frédéric recibieron el premio Nobel de Química "por su investigación en torno a la síntesis de nuevos elementos radiactivos". Además, estas investigaciones fueron fundamentales para el descubrimiento del neutrón por el físico inglés James Chadwick, por el que recibió el Premio Nobel de Física el mismo año que el matrimonio obtenía el de quí-

© ASSOCIATION CURIE JOLIOT-CURIE

Algunos galardonados con el Nobel de 1935. De izquierda a derecha, James Chadwick, Irene Joliot-Curie, Frédéric Joliot y Hans Spemann.

mica. Posteriormente, Irene, tanto sola como con su marido, continuó investigando en reacciones en cadena, concentración y aislamiento de radioisótopos y física nuclear.

En 1936, Irene fue elegida subsecretaria de estado de Investigación Científica, convirtiéndose en una de las primeras tres mujeres en la historia de Francia en formar parte del Gobierno, en una época en la que el voto femenino aún no estaba aprobado en Francia, que no se conseguiría hasta 1944. En 1946, Irene asumió la cátedra de Física General y Radiactividad de la Sorbona y la dirección del Laboratorio Curie del Instituto del Radio, centro del trabajo científico de la familia Curie. También fue nombrada directora de investigación de la Fundación Nacional de Ciencias.

Irene y Frederic fueron políticamente activos, en contra de los totalitarismos que asolaron Europa en el terrible siglo XX, "la vil Europa" en expresión del escritor Albert Camus, y formaron parte de varios movimientos pacifistas. Al igual que Pierre y Marie Curie, los Juliot-Curie hicieron público todo su trabajo sobre radiactividad, pero tras el ascenso al poder en Alemania de Adolf Hitler, decidieron mantener en secreto sus investigaciones sobre el desarrollo de reactores nucleares, investigaciones que permanecieron en un sobre cerrado en la Academia Francesa de las Ciencias hasta el final de la Segunda Guerra Mundial. En 1948, Irene viajó a Estados Unidos para dar una serie de conferencias a favor de los republicanos españoles exiliados y fue retenida veinticuatro horas por el Servicio de Inmigración en Ellis Island, la famosa puerta de entrada en Nueva York de la inmigración europea. Tras ser liberada, Irene fue recibida por el físico Albert Einstein en la Universidad de Princeton. También participó en el movimiento para concienciar sobre el peligro del uso de la energía atómica con fines armamentísticos.

En sus últimos años de vida, Irene se dedicó al diseño de un nuevo centro de investigación, el Instituto de Física Nuclear, dotado con un gran acelerador de partículas, de la Universidad de Orsay, al sur de París. Murió el 17 de marzo de 1956, a los 58 años, en el Hospital Curie, a causa de una leucemia provocada por su continua exposición al material radiactivo, igual que su madre, a la que tanto se pareció.

Reacción en cadena

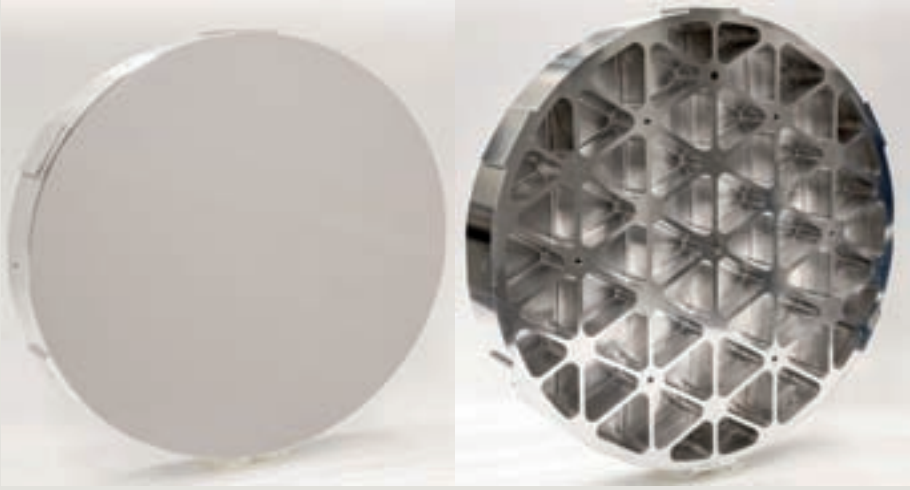
NOTICIAS

Siguiendo el rastro de un electrón

Los electrones que se desplazan por un cristal movidos por una luz siguen caminos caóticos, suben y bajan microscópicas montañas y lo hacen a velocidades próximas a la de la luz. Un proyecto de investigación internacional, en el que participa el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC) ha conseguido seguir paso a paso esta trayectoria, lo que permitirá estudiar las propiedades de los materiales y los cambios que se producen en ellos. El estudio se inscribe en la llamada física del attosegundo, premiada con el Nobel de Física de 2023. Un attosegundo es una trillonésima parte de un segundo y es la velocidad a la que se producen dichos cambios, por lo que para estudiarlos es necesario utilizar un láser que trabaje a esa misma velocidad. "Nosotros mandamos luz a un material y nos emite otra luz que nos da información del recorrido que los electrones han hecho por las diferentes bandas y, por tanto, cómo es ese material y sus propiedades", dice Rui Silva, investigador del ICMM y coautor del estudio. La información acumulada debe ser tratada con un código computacional complejo.

Aluminio para escudriñar el universo

Los telescopios espaciales disfrutan de muchas ventajas frente a los terrestres porque evitan las alteraciones que sufre la luz al cruzar la atmósfera. A cambio, presentan el problema de las dificultades de ponerlos en órbita y el peso que suponen, entre otros elementos, los espejos con los que recolectan la luz de los astros que estudian. La solución puede estar en el aluminio, un metal que, como es bien sabido, combina robustez con ligereza. La Agencia Espacial Europea (ESA) ha conseguido formar un espejo de aluminio de 30 cm, el mayor conseguido hasta la fecha, uniendo diferentes piezas mediante una técnica novedosa, y ha conseguido que su superficie sea "ópticamente perfecta".

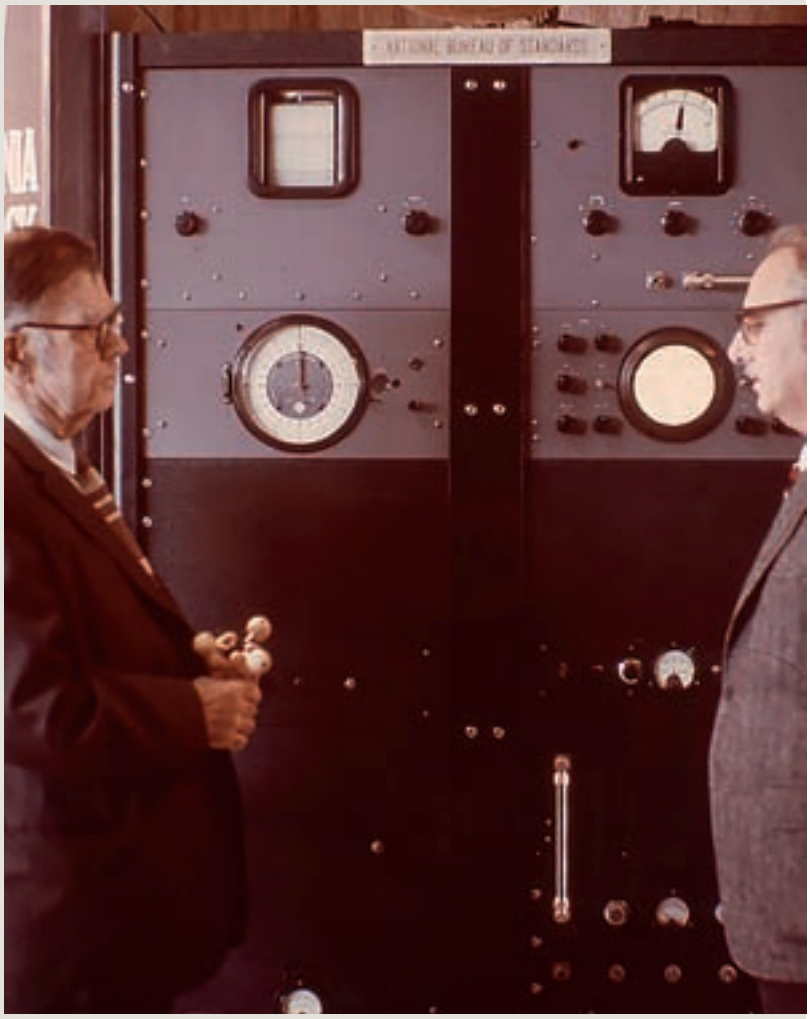


Actualmente, el aluminio se emplea en los espejos de vidrio o cerámica como una fina capa que maximiza su reflectividad, pero hacerlo completamente de aluminio es más complicado. La primera misión que llevará un espejo de aluminio de 1,1 metros será el telescopio Ariel, que se dedicará a analizar la composición atmosférica de miles de exoplanetas para detectar la presencia de gases como vapor de agua, metano y dióxido de carbono, entre otros. Su lanzamiento está previsto en 2029.

EFEMÉRIDES ▶ HACE 75 AÑOS...

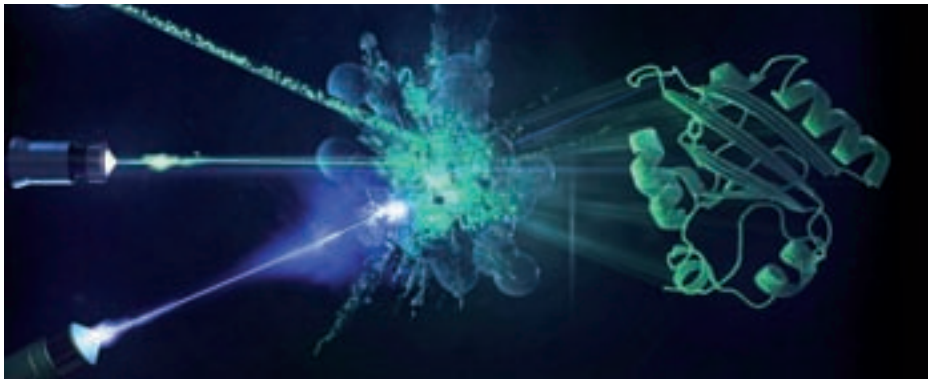
Nace el primer reloj atómico

Desde los albores de las civilizaciones la humanidad ha intentado conseguir medir el tiempo con la mayor exactitud posible. Diferentes movimientos cíclicos naturales permitieron el desarrollo de los primeros sistemas, siendo uno de los más utilizados el del movimiento aparente del Sol en el cielo. En 1656 el físico holandés Christiaan Huygens inventó el reloj mecánico a partir de los movimientos de un péndulo. Durante los siguientes tres siglos se fueron perfeccionando los relojes, pero el gran salto hacia la exactitud tuvo que esperar a 1949, cuando el norteamericano Harold Lyons, físico del National Bureau of Standards (hoy National Institute of Standards and Technology, NIST) construyó el primer sistema que utilizaba las vibraciones atómicas y moleculares para medir el tiempo, tras conseguir determinar la vibración de una molécula de amoniaco, que oscila 23.870 millones de veces por segundo, y lo hace de manera constante, siempre que la temperatura a la que se encuentre sea también constante. En la imagen Lyons (izquierda) y el entonces director del NIST, Edward Condon, junto al reloj.



La lluvia de diamantes es un fenómeno común

En 2022 se detectó por primera vez un fenómeno curioso: en Neptuno y Urano, los planetas conocidos como los gigantes helados, la presión y temperatura del interior provoca la formación de diamantes a partir de diversos compuestos de carbono. Estos diamantes caen hacia el centro del planeta desde alturas de unos 10 000 kilómetros. Un nuevo experimento, realizado en el laboratorio europeo XFEL, ha puesto de manifiesto que el fenómeno es más frecuente de lo que se pensaba ya que se produce en condiciones de presión y temperatura más bajas, por lo que podrían generarse a mayor altura y recorrer mayor distancia. Según los autores del estudio el fenómeno podría tener una importante influencia en la formación de los campos magnéticos de esos planetas, al arrastrar gas y hielo, provocando una corriente de fluidos conductores que actúa como una dinamo. XFEL es un proyecto conjunto de 12 países europeos, entre ellos España. La instalación, de 3,4 kilómetros de longitud, se encuentra situada en Hamburgo (Alemania) y opera el láser de rayos X más potente del mundo.



AGENDA

La fábrica de luz. Museo de la energía

Avda. de la Libertad 46
24402 Ponferrada (León)
T: 987 400 800

En el interior de una de las naves principales de la antigua central eléctrica de Compostilla, en Ponferrada, en pleno Bierzo, inaugurada en 1949 y convertida por sus ampliaciones posteriores en una de las más importantes del desarrollismo de los años 60, se encuentra el Museo de la Energía, un espacio expositivo y cultural, que muestra cómo se "fabricaba luz" en aquella inmensa nave a partir del carbón extraído en Villablino, al norte de la comarca y guarda y exhibe material de las instalaciones energéticas de la época y también de la historia del Bierzo y de sus gentes en aquellos tiempos. A medio camino entre la arqueología industrial y la divulgación científica es también un espacio que acoge todo tipo de actividades culturales al servicio de los habitantes de la zona y de los visitantes. Inaugurado en 2011 y gestionado por la Fundación Ciudad de la Energía, la restauración del edificio y su interior lo ha convertido en una de las joyas del patrimonio industrial español, reconocido con el premio Europa Nostra 2012 y una nominación a los premios European Museum of the Year en 2015.

Acceso a la web de La fábrica de luz. Museo de la energía

LIBRO

Conversaciones geológicas
Entrevistas imaginarias a cuatro grandes geólogos
Carlos M. Pina
Ediciones Complutense, 2023
143 páginas

Uno de los sueños de Carlos Pina, profesor de Cristalografía y Mineralogía en la Universidad Complutense de Madrid, como seguramente de muchos otros científicos, habría sido conocer a algunos de los grandes patriarcas de su disciplina, afán normalmente imposible por no haber coincidencia en el tiempo, por lo que ha suplido esta anacronía con la imaginación. Conociendo la obra y las ideas de cuatro de los grandes científicos que construyeron los fundamentos de la geología, hace un experimento mental, transcrito a texto, en el que se imagina que mantiene una extensa conversación con cada uno de ellos. Por las páginas de este libro desfilan James Hutton, quien a mediados del siglo XVIII describió el ciclo permanente de erosión, sedimentación, hundimiento, metamorfosis y elevación de las rocas y el papel que juega el calor interno del planeta; Charles Lyell, que propuso la teoría uniformista, uno de los pilares de la Geología; Charles Darwin, que recogió muestras de rocas y fósiles durante su periplo en el Beagle y realizó aportaciones en geología, como la explicación de la formación de los atolones; y Alfred Wegener, que propuso la teoría de la deriva continental, que tardó en ser aceptada medio siglo y hoy es el cimiento principal del edificio de la geología.

EN RED

Los parques nacionales a vista de pájaro

Los parques nacionales son las áreas de mayor protección ambiental prevista en la legislación española, por lo que visitarlos permite conocer los lugares más emblemáticos de la naturaleza de nuestro país. España cuenta con 16 parques nacionales, que son representativos de otros tantos ecosistemas. Para conocerlos adecuadamente es imprescindible visitarlos de manera presencial, pero antes de hacerlo se puede hacer una visita virtual por todos ellos y recabar información amplia acerca de sus características y curiosidades, su orografía, su historia, su flora, su fauna, las rutas disponibles, los puntos de acceso e información y otros datos. También se pueden observar diferentes mapas temáticos, una galería de imágenes y realizar un recorrido como si fuéramos montados en un dron, mediante visualizadores 3D interactivos. Además de disponer de un potente zoom para acercarse al terreno cuanto se desee, se puede navegar en cualquier dirección y se puede elegir la hora y el mes para descubrir cómo cambias los paisajes a lo largo del día y durante el año. Todo ello se encuentra en la web que el Instituto Geográfico Nacional dedica a los parques nacionales, de acceso libre.

https://parquesnacionales.ign.es/web/cnig/inicio

Españolas en Marte

El pasado año nueve mujeres españolas llevaron a cabo la misión Hypatia I, por la que siete de ellas (las otras dos eran suplentes) pasaron 14 días recluidas en la Mars Desert Research Station, un emplazamiento de experimentación que simula las condiciones del planeta Marte, situado en una zona desértica de Utah, en Estados Unidos. Se trata de una iniciativa puesta en marcha por la Mars Society, una institución privada dedicada a promover el estudio del planeta rojo y facilitar el desarrollo de tecnologías que permitan, algún día, enviar tripulaciones humanas allí y sobrevivir en un ambiente extremadamente hostil, donde tendrán que generar sus propios alimentos, el agua y el oxígeno necesarios para su supervivencia y construir con materiales locales los habitáculos donde deberán pasar una larga estancia. Las mujeres del proyecto Hypatia I, lideradas por la astrofísica Mariona Badenas-Agustí, ensayaron una batería a base de orina humana y compuestos de hierro, muy abundantes en Marte, y exploraron las posibilidades de la acuicultura para proporcionar proteína animal a un futuro asentamiento humano. En marzo de 2024 han dado a conocer los nombres que formarán parte de la misión Hypatia II, que se llevará a cabo en 2025.

https://hypatiamars.com/

REDES

@Malditaes

Maldita es una plataforma dedicada a detectar, investigar y denunciar la desinformación y los bulos que circulan por las redes. Consulta obligatoria ante cualquier duda.

Ucrania en directo

UkraineWorld mantiene información regular sobre la invasión rusa a esta república, su impacto cotidiano sobre sus gentes, los avances y retrocesos del frente y la denuncia de los crímenes de guerra.

@ForoQyS

El Foro Química y Sociedad aglutina a científicos, docentes, empresarios, sindicatos y gestores del ámbito de esta disciplina, para defender su aportación al bienestar de la sociedad.

@j_sepr

Jóvenes SEPR es la cuenta que recoge las imágenes de las actividades que realiza la Comisión de Jóvenes de la Sociedad Española de Protección Radiológica.

josemotatv

Para pasar un rato divertido, el célebre humorista José Mota publica aquí entretenidos vídeos con variados chistes y gags. Más de dos millones de seguidores disfrutan ya de su humor en esta plataforma.

Panorama

La ministra de Defensa, Margarita Robles, visita el CSN

El pasado 26 de febrero, Margarita Robles, ministra de Defensa, acompañada por el jefe de la Unidad Militar de Emergencias (UME), el teniente general Francisco Javier Marcos, visitó la sede del Consejo de Seguridad Nuclear. Fue recibida por el presidente del organismo regulador, Juan Carlos Lentijo, y se reunió con los consejeros Javier Dies, Francisco Castejón, Pilar Lucio y Elvira Romera, así como el secretario general del organismo, Pablo Martín y el director técnico de Protección Radiológica, Javier Zarzuela. El encuentro se enmarca en la colaboración regular entre ambas instituciones mediante convenios, protocolos, participación en cursos, ejercicios y otros proyectos conjuntos. La ministra agradeció la labor del regulador en la protección de los ciudadanos.

Durante el encuentro se repasó el estado del convenio rubricado con la Unidad Militar de Emergencias (UME) sobre la actuación en la planificación, preparación y respuesta ante situaciones de emergencia nuclear y radiológica, y que ha dado lugar a diversos protocolos, como el de la afiliación a la red nacional de emergencias, el apoyo logístico, la cesión de equipos radiométricos y, en especial, el suscrito sobre el mantenimiento de un centro de emergencias de respaldo, en las dependencias de la UME, conocido como SALEM-2.

La visita se completó con un recorrido por la SALEM, el centro operativo de la Organización de Respuesta ante Emergencias del Consejo, que proporciona la infraestructura material básica para la ejecución del Plan de Actuación ante Emergencias.

Entra en vigor la revisión de la IS-10, sobre criterios de notificación de sucesos

El 3 de febrero entró en vigor la Instrucción IS-10, revisión 2, por la que se establecen los nuevos criterios de notificación de sucesos al organismo regulador de las centrales nucleares en funcionamiento, que puedan tener relación con la seguridad nuclear o la protección radiológica. La actualización se fundamenta en el análisis de la experiencia acumulada y continúa permitiendo al CSN la adopción de medidas apropiadas en un plazo acorde con la situación real de la instalación, en caso necesario. Se actualizan y aclaran los criterios de notificación y los plazos, de manera que la pronta notificación pasa de una a cuatro horas, para que el titular tenga más tiempo para recopilar toda la información necesaria, y se podrá realizar mediante la sede electrónica

El Consejo acoge y coordina la visita del director de la Agencia de Energía Nuclear (NEA/OCDE)

El director general de la Agencia de Energía Nuclear (NEA/OCDE), William Magwood, realizó el pasado mes de enero una visita institucional a España, que fue coordinada por el CSN e incluyó una reunión con el Pleno del Consejo el día 16 en la sede del regulador. Durante el encuentro, Magwood destacó la importancia de las actividades de la NEA en seguridad nuclear y protección radiológica y agradeció la importante labor de los expertos del CSN que participan en los distintos grupos de trabajo de la agencia. Se trataron cuestiones relacionadas con la cadena de suministro, el proceso de regulación de la seguridad en el sector, la gestión del envejecimiento, el proyecto FACE sobre lecciones aprendidas tras el accidente de Fukushima Daiichi, así como iniciativas en materia de igualdad de género, mentoría, educación y formación, entre otras cosas.

Dos técnicos del CSN reciben la medalla al Mérito de la Protección Civil

El coordinador técnico de Emergencias y el jefe del Área de Intervención y Preparación de Actuantes en Emergencias del CSN, Alfredo Mozas y Antonio Ortiz, respectivamente, recibieron el pasado 12 de febrero la medalla de bronce con distintivo azul al Mérito de la Protección Civil, de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCE), del Ministerio del Interior. Se reconoce así su colaboración con el personal de la DGPCE en la realización de ejercicios en los entornos de las centrales nucleares y la formación impartida a actuantes, lo que supone una cooperación operativa fluida y provechosa para ambas instituciones.

Las condecoraciones al mérito de la Protección Civil se entregan anualmente, desde 1982, en un acto presidido por el ministro del Interior, para reconocer comportamientos y trayectorias que comparten los valores del Sistema Nacional de Protección Civil. Cuentan con tres categorías: oro, plata y bronce; y tres modalidades en cada una de ellas: rojo para actos de heroísmo o solidaridad, azul para colaboración y blanco para cooperación. El CSN es uno de los organismos de más larga trayectoria de colaboración en este ámbito y ha sido reconocido en otras ocasiones. En la edición anterior fue premiada su Sala de Emergencias (SALEM).

El presidente del regulador nuclear estadounidense visita el Consejo

Una delegación de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC), encabezada por su presidente, Christopher T. Hanson, visitó el 27 de febrero la sede del Consejo de Seguridad Nuclear, donde mantuvo una reunión con el presidente del organismo regulador español, Juan Carlos Lentijo, y el resto del Pleno del CSN, con el objetivo de estrechar lazos y renovar la fluida colaboración entre ambas instituciones, de especial interés para España, ya que la mayor parte de las centrales nucleares españolas son de diseño estadounidense. Hanson elogió dicha colaboración y agradeció la cálida acogida. Lentijo, por su parte, destacó "la relación continua a nivel técnico e institucional a través de los numerosos encuentros en diferentes foros internacionales. Estados Unidos cuenta con una dilatada experiencia en el ámbito de la seguridad y la regulación, que de hecho constituye una referencia fundamental para nuestro marco y practicas reguladoras".

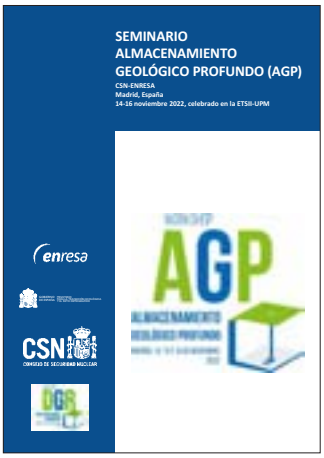
La delegación visitó la Sala de Emergencias (SALEM) y el Centro de información. Hanson impartió también una conferencia en la que expuso los principales retos del regulador estadounidense y valoró la relación con su homólogo español. Durante la estancia de los miembros de la NRC en España, de tres días de duración, visitaron también la central nuclear Trillo y las instalaciones de la empresa Equipos Nucleares (ENSA), en Cantabria.

Acuerdos del Pleno del CSN destacados

- Pleno del 7 de febrero de 2024. El CSN informa favorablemente la modificación de los sistemas de seguridad física de la central nuclear Cofrentes
- Pleno del 10 de enero de 2024. El CSN emite una Instrucción Técnica Complementaria destinada a instalaciones de radiografía industrial con rayos X.

Acceso a todas las actas

Últimas publicaciones



Seminario Almacenamiento Geológico Profundo (AGP)

Instrucción IS-10, revisión 2, por la que se establecen los criterios de notificación de sucesos al CSN por parte de las centrales nucleares

Centro de información

Acceso al Centro de documentación del Consejo de Seguridad Nuclear

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 Atomic and molecular scale science and technology

Customised pharmaceutical products and targeted treatments, optical instruments, computer components, storage devices and batteries, cosmetics, textiles... Nanotechnology is already massively present around us and promises to revolutionise all areas of science and industry.

13 ICRP: A century at the forefront of radiological protection across the world

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) is an independent scientific institution set up in 1928 and recognised internationally as the most reliable source of information and guidance on protection against ionising radiations. The Commission is made up of experts from 30 countries, among them Spain.

34 Lymphocytes armed against cancer

In recent years a technique has been developed for the treatment of certain haematological cancers which has been successful in many patients not responding to other treatments. This technique is known as CAR-T and is a combination of cellular therapy, immunotherapy and gene therapy in a single process. The application of this technique to solid tumours is currently also under study.

39 Storm clouds over the Antarctic

The frozen continent - the dryest, coldest, windiest and most isolated part of the world and a paradise that was declared a Nature Reserve devoted to Peace and Science in Madrid in 1991 – is threatened by exogenous factors such as climate change, pollution and tourism. Despite its remote location, it plays a crucial role in the world's climate, for which reason its degradation will have a boomerang effect on the rest of the planet.

54 54 Exploring the frontiers of nuclear and radiological safety

In order to be able to carry out its task as a regulatory body, the CSN needs to maintain its technical capabilities at the highest level and enhance them through the contributions made by scientific and technical research. For this purpose, it has available a support programme for R&D&I activities, as well as agreements and participations in national and international projects.

58 Irene Joliot-Curie and man-made radioactivity

Pierre and Marie Curie had two daughters. The eldest, Irene, who was born in 1897, followed the path mapped out by her parents and, in collaboration with her husband Frédéric Joliot, carried out research in the field of radioactivity at the Radium Institute, founded by her mother. Together they produced the first man-made radioactive material, for which they were awarded the Nobel Chemistry Prize in 1935.

RADIOGRAPHY

24 Reactor containment leak testing at nuclear power plants

Described here are the periodic leak tests that are carried out on the containments of the Spanish nuclear power plants, in accordance with CSN safety instruction IS-27.

INTERVIEW

28 William D. Magwood, general manager of the Nuclear Energy Agency (NEA-OCDE)

"Public communication is the cornerstone of nuclear safety".

TECHNICAL ARTICLES

18 Migration to improved OTS's at Spanish nuclear power plants

The Operating Technical Specifications (OTS) are the set of minimum requirements that guarantee the safe operation of a nuclear power plant. In recent years they have been upgraded by way of what are known as improved OTS's, and in June of this year the transition to the new model will be completed at the Almaraz, Vandellós 2 and Ascó plants.

44 Lessons learned from development of the INVEAT Plan

A large part of the INVEAT Plan for investments in high-tech medical equipment, with funds amounting to almost 800 million euros, has been applied by hospitals for the acquisition of equipment using ionising radiations, for which the CSN has had to issue preliminary reports authorising their operation. This has posed a challenge for the Council and has allowed lessons to be learned applicable to similar activities in the future.

CSN I+D

52 Virtual reality for training on radiological emergencies

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