



Reactores SMR, la energía nuclear a pequeña escala

Protección Radiológica Ambiental



Alta cualificación para contenidos complejos y múltiples



Hacia un Plan
Nacional contra
el radón en España



Súmate a los 110.000

Desde su inauguración en 1998, los 110.000 visitantes del Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear han tenido ocasión de aproximarse al conocimiento sobre las radiaciones ionizantes, sus usos, sus riesgos y los controles y la protección que son necesarios para garantizar su utilización fiable, en la cual el CSN –como organismo encargado de la seguridad nuclear y la protección radiológica– juega un papel muy importante.

En la vida diaria utilizamos las radiaciones con una enorme frecuencia, tanto en relación con la salud y la medicina –en diagnóstico y en terapia– como también en la industria y en la investigación. A través de un recorrido guiado por los 29 módulos, se pueden conocer con detalle estos aspectos relacionados con las radiaciones. Consigue más información en www.csn.es/index.php/es/centro-informacion o pide cita en centroinformacion@csn.es. Súmate a los 110.000.

Hacia un Plan Nacional contra el radón

Tres reportajes técnicos de gran actualidad salen a la luz en este nuevo número de ALFA. El primero sobre los trabajos que están teniendo lugar para elaborar un Plan Nacional contra el radón en España, el segundo sobre las modificaciones realizadas en las centrales nucleares españolas tras los sucesos de Fukushima y un tercero sobre dosimetría biológica.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) está siendo uno de los actores en la elaboración de este Plan Nacional contra el radón, que se encuentra en fase avanzada. La Directiva europea 2013/59/Euratom requiere a los Estados miembros de la UE que pongan en marcha planes nacionales de actuación contra este gas natural radioactivo, al que se sitúa en segundo lugar como responsable de los cánceres de pulmón en nuestro país.

El segundo reportaje aborda la implantación de las modificaciones realizadas en las centrales nucleares españolas tras el accidente de Fukushima de marzo de 2011. Tras este suceso en Japón, la Unión Europea decidió someter a sus centrales nucleares a un conjunto de “pruebas de resistencia” para comprobar situaciones semejantes a las ocurridas en el país asiático, la mayor parte de las cuales ya han sido implantadas.

El último trata sobre la dosimetría biológica, como herramienta fundamental en emergencias para calcular la estimación de la exposición a las radiaciones ionizantes y sus efectos biológicos.

La entrevista de este número es a Ramón Gavela, director del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, quién asegura que “el centro de gravedad del Ciemat es el desarrollo tecnológico muy en contacto con las empresas”.

Una directiva europea requiere a los Estados de la UE que pongan en marcha planes nacionales contra este gas natural radioactivo

La radiografía trata sobre el programa de Protección Contra Incendios en las centrales nucleares españolas, y de cómo se garantiza la operación segura y la protección frente al fuego de los elementos importantes para la seguridad y la instalación en su conjunto.

En “El CSN por dentro” la sección para explicar cómo es, cómo actúa y quienes llevan el día a día del Consejo de Seguri-

dad Nuclear, se explica la labor de la subdirección de Protección Radiológica Ambiental, una subdirección con nombre aparentemente sencillo pero de contenido múltiple, al frente de la cual se encuentra Lucila Ramos, que asegura que “preparación, dedicación y entusiasmo definen a los profesionales de este equipo”.

Los reportajes de divulgación científica abordan también asuntos de máxima actualidad, como la revolución de la energía nuclear a pequeña escala por medio de los reactores modulares de pequeño tamaño, que buscan producir energía más segura y más barata. Otro sobre Cyberknife, la máquina que ha conseguido una revolución en los quirófanos al permitir la radiocirugía sin bisturí. Y también un extenso reportaje sobre el moderno laboratorio subterráneo de Canfranc construido aprovechando la excavación de un túnel en los años veinte del pasado siglo bajo los Pirineos.

En “Ciencia con nombre propio” nada más y nada menos que Albert Einstein, justo noventa y nueve años después de que el científico planteara la existencia de las ondas gravitacionales.

Y finalmente, destacar que en “Panorama” rendimos un sentido homenaje a Luis Gutiérrez Jorda, químico pionero de la investigación nuclear recientemente fallecido.

alfa

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 34 / Año 2017

Comité Editorial
Fernando Martí Scharfhausen
Antonio Munuera Bassols
Fernanda Sánchez Ojanguen
Enrique García Fresneda
Ángel Laso D'Lom
Felipe Teruel Moya

Comité de Redacción
Ángel Laso D'Lom
Natalia Muñoz Martínez

Manuel Aparicio Peña
Ana Gozalo Hernando
Felipe Teruel Moya

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
Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

Fotografías
CSN, Estugraf, Miguel G. Rodríguez,
Agencias (ThinkstockPhotos, Getty)

Impresión
Estugraf Impresores S. L.
Pol. Ind. Los Huertecillos, Nave 13
28350 Ciempozuelos (Madrid)

Fotografías de portada
Agencias

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



06 Un túnel para defender la frontera de la ciencia

Bajo el macizo de El Tobazo, a resguardo del ruido que provocan los millones de partículas que cada segundo golpean la Tierra, varios experimentos pretenden desentrañar algunos de los principales misterios del universo. El lugar es el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), construido aprovechando la excavación de un túnel perforado en los años veinte del siglo pasado para comunicar España con Francia.

36 Albert Einstein: la vida paradójica

El suyo sigue siendo uno de los apellidos más reconocibles en todo el mundo, sinónimo de genio desde hace generaciones. La gran paradoja de Einstein es que ganó celebridad mundial trabajando en un campo cuya explicación era difícil para la inmensa mayoría que le reverenciaba. Tras el tópico de científico distraído se escondía una personalidad compleja y una vida donde los puntos oscuros se mezclaron con los periodos de luz.



44 La radiocirugía sin bisturí

Durante el último medio siglo, la radiocirugía robotizada se ha convertido en una alternativa ventajosa para tratar tumores pequeños en el cerebro y en otras partes del cuerpo. El Cyberknife, uno de los sistemas más polivalentes y evolucionados, es un tratamiento con radiaciones, indoloro, preciso, eficaz y con pocos efectos secundarios. Está disponible en varios centros hospitalarios públicos y privados de España, y se aplica de forma ambulatoria.



58 La revolución de la energía nuclear a pequeña escala

Aparte de su interés científico y comercial, la modularidad va a permitir que los reactores nucleares de pequeño tamaño SMR apuesten por el camino de la versatilidad y puedan convivir, completar y, a veces, sustituir a las centrales nucleares convencionales que hayan completado su ciclo de operatividad. Con la ventaja añadida de ser más seguros, pueden convertirse en un sistema complementario de producción de electricidad a costes competitivos.

42 RADIOGRAFÍA

Programa de Protección Contra Incendios en las Centrales Nucleares Españolas.

EL CSN POR DENTRO

20 Una subdirección con nombre sencillo, pero de contenido múltiple

Su nombre puede invitarnos a pensar que nos encontramos ante el equipo humano del Consejo de Seguridad Nuclear encargado, sin más, de proteger el medio ambiente ante las radiaciones ionizantes. ¡Nada más lejos de la realidad! La subdirectora de Protección Radiológica Ambiental, Lucila Ramos, nos explica que se trata de “una subdirección poliédrica, de nombre simplificado, pero de contenido múltiple y complejo”.

ENTREVISTA

14 Entrevista a Ramón Gavela, director del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

“El centro de gravedad del Ciemat es el desarrollo tecnológico, muy en contacto con las empresas”

ARTÍCULOS TÉCNICOS

23 Hacia un Plan Nacional contra el radón en España

El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco, y el responsable de unas 1.500 muertes al año en España. Para reducir la carga que la exposición a este agente cancerígeno supone para la salud de la población, la Directiva europea 2013/59/Euratom requiere que los Estados miembros pongan en marcha planes nacionales de actuación contra el gas. El Plan Nacional contra el radón debe implantarse en nuestro país en 2018.

30 Modificaciones realizadas en las centrales nucleares españolas tras el accidente de Fukushima

El marco regulador español requiere a los titulares de centrales nucleares un programa de protección contra incendios ajustado a la Instrucción IS-30 del CSN.

50 Dosimetría biológica, una herramienta fundamental en emergencias

Permite la estimación de la exposición a la radiaciones ionizantes y sus efectos biológicos.



63	Reacción en Cadena
64	Panorama
68	Acuerdos del Pleno
69	csn.es
70	Publicaciones

Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Un túnel para defender la frontera de la ciencia





Bajo el macizo de El Tobazo (Huesca), a resguardo del ruido que provocan los millones de partículas que cada segundo golpean la Tierra, varios experimentos pretenden desentrañar algunos de los principales misterios del universo. El lugar es el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), construido aprovechando la excavación de un túnel perforado en los años veinte del siglo pasado para comunicar España con Francia. En la superficie, anunciando los fenómenos fascinantes que se estudian en las entrañas de la Tierra, se encuentra la impresionante Estación Internacional de Canfranc. Este edificio modernista, de 241 metros de longitud y 150 puertas de acceso, es la segunda mayor estación de Europa después de la de Leipzig (Alemania).

■ Texto **Daniel Mediavilla** | Periodista | ■

El túnel se cerró en 1970 y a partir de 1985 comenzó a ser utilizado por científicos para buscar una escurridiza partícula subatómica: el neutrino. El interés de construir un observatorio del cosmos a 850 metros de profundidad es similar al de otros observatorios similares en la superficie. Los lugares ideales para colocar telescopios son las cimas de montañas alejadas de los centros urbanos y su contaminación lumínica. El objetivo es que los fotones procedentes de las estrellas lleguen con la mayor nitidez posible a las lentes que

los recogen y sea más fácil interpretar la información que transportan.

En el caso de las partículas que se estudian en Canfranc, el ruido que hay que evitar es el que producen los rayos cósmicos que golpean la superficie de nuestro planeta continuamente. Si se tratase de buscar la materia oscura al aire libre, una gran cantidad de partículas ahogarían en ruido los detectores y sería imposible determinar con seguridad si se ha encontrado un neutrino o la partícula de que esté compuesta la materia oscura. Por eso, se utilizan metros de ro-

ca como filtro. Pocas partículas son capaces de atravesar toda esa materia, pero los neutrinos lo hacen con facilidad. De hecho, su interacción con el resto de la materia es tan escasa que un neutrino sería capaz de atravesar un muro de plomo de millones de kilómetros de grosor sin inmutarse.

Pese a formar el 84% de la materia del universo (la materia que vemos y de la que estamos hechos es el restante 16%), aún se desconoce casi todo sobre ella y nadie ha logrado detectarla. Esta materia es en realidad una hipótesis que sirve para explicar un fenómeno que no se sabe cómo explicar. Desde la década de 1930, se ha observado que la masa de los conjuntos estelares que captan los telescopios no es suficiente para mantener la elevada velocidad de sus órbitas. Para dar sentido a ese movimiento, era necesaria la existencia de una materia que ejerciese fuerza gravitatoria pero no emitiese luz, lo que se bautizó como materia oscura. Las partículas que compondrían esta materia también tendrían una interacción muy débil con la materia ordinaria y por eso también sería interesante ponerle una trampa en el interior de una montaña.

En la actualidad, el laboratorio cuenta con unos 1.250 metros cuadrados, que comprenden dos salas experimentales que albergan seis experimentos. Además, dispone de una sala blanca y otra de almacenamiento de gases. Dos de los experimentos en marcha están dedicados a la materia oscura, tres al estudio de los neutrinos y uno más a estudios sísmicos.

En busca de la materia oscura

El primero de los experimentos dedicados a buscar la materia oscura es ANAIS (Modulación Anual con Centelleadores de NaI(Tl), por sus siglas en inglés), liderado por el grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza. Se trata en realidad de un intento de



Investigadores procedentes de universidades y laboratorios nacionales e internacionales trabajan en experimentos dedicados a la materia oscura, la física de neutrinos y la geodinámica.



El laboratorio cuenta con unos 1.250 metros cuadrados, con dos salas experimentales que albergan seis experimentos. Además, dispone de una sala blanca y otra de almacenamiento de gases. Dos de los experimentos en marcha están dedicados a la materia oscura, tres al estudio de los neutrinos y uno más a estudios sísmicos.

comprobar si el único experimento que parece haber dado resultados positivos en la detección de partículas de materia oscura estaba en lo cierto.

En 2000, Rita Bernabei, una investiga-

dora de la Universidad de Roma, aseguró que había detectado partículas de materia oscura con su experimento Dama. En realidad, lo que había hecho era confirmar una predicción teórica que dice que

la cantidad de WIMPs (partículas masivas de interacción débil que, en teoría, conforman la materia oscura) en las intermediaciones de la Tierra fluctúa a lo largo del año dependiendo del punto que

ocupe nuestro planeta en su órbita alrededor del Sol, que a su vez gira en torno al centro de la Vía Láctea. Durante varios años, en un laboratorio subterráneo parecido al de Canfranc situado bajo la montaña italiana de Gran Sasso, Bernabei y su equipo registraron los destellos de estas partículas cuando chocaban contra un detector de 100 kilos de cristales de yoduro de sodio.

La estadística mostró que la variación en la frecuencia de los impactos coincidía con la densidad de materia oscura prevista para cada una de las regiones de

la galaxia que atraviesa la Tierra a lo largo del año. Sin embargo, como no había ningún experimento igual en todo el mundo, la comunidad científica respondió con escepticismo, aunque una segunda versión más avanzada del detector, Dama/Libra, mejoró la acogida. Ahora, ANAIS quiere replicar aquel experimento con un detector más sensible para confirmar o refutar el hallazgo de un grupo independiente.

Un segundo detector instalado en el LSC para buscar WIMPs es ArDM (Argón Materia Oscura, de sus siglas en in-

glés). En este caso el material empleado para capturar estas partículas es el argón y se trataría de obtener una detección directa. Eso se conseguiría midiendo los retrocesos nucleares que se producen al chocar una WIMP contra un núcleo del gas noble. Para incrementar las probabilidades de uno de estos choques, los responsables del proyecto, que incluyen al CIEMAT, el ETH Zurich, la Universidad de Zurich, la Universidad de Granada y el CERN, han reunido una tonelada de argón y lo han protegido frente a todo tipo de interferencias radiactivas.

Actividad garantizada hasta finales de 2021

■ Texto P. Romanillos / Agencias ■

El Consejo de Ministros aprobó en 2015 la ampliación, hasta 2021, del convenio que en su día se firmó para poner en marcha el consorcio del Laboratorio Subterráneo de Canfranc, una infraestructura científica ubicada en Aragón y centrada en la investigación de física de partículas y astropartículas.

Hasta 2015 este laboratorio había recibido de los tres organismos implicados casi 17 millones de euros, de los cuales 14 millones de euros fueron aportados por la Administración General del Estado. El objetivo de la orden autorizada es dar continuidad al consorcio, que finalizaba el 31 de diciembre de 2015.

Por este acuerdo se ampliaba su vigencia hasta el 31 de diciembre de 2021 y, además, se modifican algunas cláusulas referentes a las aportaciones dinerarias y en especie.

Investigadores y presupuesto

En el caso del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, las aportaciones ascienden a 6.339.648 euros en gastos y 300.000 euros en inversiones, y por su parte, en el caso del Gobierno de Aragón, a 3.064.452 euros.

En este nuevo período hasta 2021, la aportación económica es de menor cuantía debido a que en el primero, hasta 2015, se hizo una mayor inversión para la cons-

trucción y puesta en marcha de las instalaciones del laboratorio.

Por su parte, las aportaciones de la Universidad de Zaragoza serán aportaciones en especie, consistentes en la asignación de investigadores y técnicos del Grupo de Investigación en Física Nuclear y Astropartículas, y en la cesión del uso de un laboratorio de 2.400 metros cuadrados.

Instalaciones pioneras y de referencia

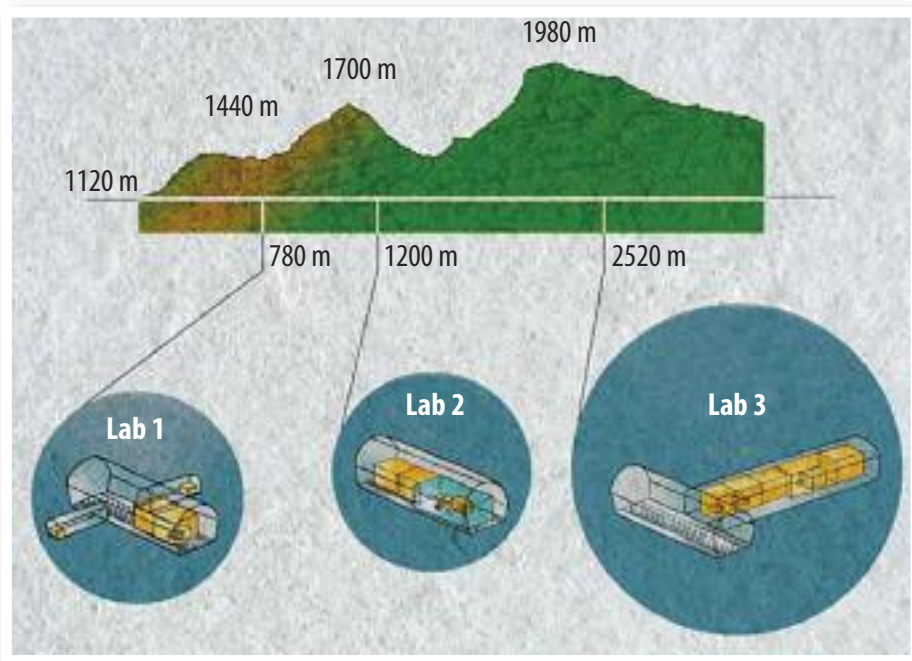
El Gobierno destacó el “gran impacto científico” de esta instalación, que “es pionera y suponen un referente” en su campo, a la que se garantizaba de esta forma el funcionamiento a medio y largo plazo.

El Laboratorio subterráneo de Canfranc es la única instalación de este tipo en España y una de las pocas existentes en el mundo dedicada a la física de astropartículas. Las galerías para experimentos de este laboratorio subterráneo están excavadas en la roca, a una profundidad de 850 metros por debajo de la cumbre pirenaica del Tobazo en la vertiente de los Pirineos Aragoneses, entre los túneles ferroviarios y la carretera del Somport. Esta peculiar ubicación elimina la mayor parte de la radiación cósmica presente en la superficie terrestre y permite desarrollar experimentos que, por su sensibilidad, requieren un bajo fondo de radiación. ▀

El éxito de proyectos de este tipo es de una importancia revolucionaria para la física. Lo mismo sucede con los proyectos dedicados al estudio de neutrinos. Esta partícula, como ahora sucede con la materia oscura, fue planteada en su origen como una posibilidad para resolver una incoherencia entre la física teórica y la observada hasta el momento. A finales de los años veinte, el físico Wolfgang Pauli trataba de entender por qué cuando se desintegraban algunos núcleos atómicos desaparecía cierta cantidad de energía de manera inexplicable. Eso era una transgresión imposible de las leyes físicas y para salvar el principio de conservación de la energía, Pauli propuso la existencia de una partícula fantasmagórica, sin carga eléctrica, con una masa ínfima y que prácticamente no interaccionaría con la materia. Veintiséis años después, Frederik Reines y Clyde Cowan, junto a un reactor nuclear, detectaron por primera vez un neutrino.

Desde entonces, la física de neutrinos se ha convertido en una nueva forma de conocer el mundo que nos rodea y ha sido merecedora de dos premios Nobel en los últimos 15 años. En Canfranc, hay dos experimentos que son colaboraciones con experimentos mayores. SuperKGD, un proyecto conjunto del Instituto para la Investigación de Rayos Cósmicos de Tokio (ICRR), el Instituto de Física y Matemáticas del universo de la Universidad de Tokio, la Universidad de California, en Irvine, y la Universidad Autónoma de Madrid, es una parte del observatorio Superkamiokande. Este detector de neutrinos, construido en una mina abandonada en Japón, detectó los primeros neutrinos procedentes de fuera del Sistema Solar. El experimento instalado en el Laboratorio de Canfranc utiliza detectores de germanio para realizar medidas de bajo fondo.

Un segundo experimento que sirve de apoyo para otro gran experimento de



Las instalaciones del laboratorio están excavadas en una roca de gran calidad, que permitirá la planificación de una instalación de astrofísica y una nueva propuesta sobre biología a gran profundidad.

investigación de neutrinos es BiPo. Como el anterior, es una amplia colaboración entre el Laboratorio del Acelerador Lineal (LAL) de París (Francia), el Laboratorio de Física Corpuscular (LPC) de Caen (Francia), el Instituto de Física

neo de Modane (Francia), busca un fenómeno que se conoce como desintegración doble beta sin neutrinos. Tras ese calificativo puede encontrarse la explicación a la existencia misma del cosmos tal y como lo conocemos.

Detrás de ese tipo de desintegración también se encuentra el tercer experimento dedicado a los neutrinos que alberga el LSC y el más relevante de todos ellos. Se trata de NEXT, un proyecto liderado por el físico del IFIC (UV/CSIC) Juan José Gómez Cadenas. Este detector incluye una cámara de 100 kilos de xenón-136, un gas inerte que centellea. Esas características son necesarias para que las partículas cargadas que surgiesen de una posible desintegración doble beta sin neutrinos atravesasen el detector, dejando una estela con la que reconstruir después qué fenómeno se ha producido.

El interés de esta búsqueda, en la que están inmersos grupos de investigación de todo el mundo, se encuentra en que, de existir, la desintegración ayudaría a determinar la masa del neutrino y significaría que es su propia antipartícula. Esta

Desde que inició su actividad en 2010, las principales líneas del programa científico del laboratorio están relacionadas con la física de astropartículas

Corpuscular de Valencia, la Universidad de Osaka (Japón) y la Universidad de Zaragoza. Este proyecto tiene como objetivo medir la radiopureza de grandes láminas de materiales utilizados en el experimento SuperNEMO. Este proyecto, instalado en el Laboratorio Subterrá-



“Tanto ANAIS como NEXT son experimentos que pueden tener resultados de relevancia mundial para la física”

última información lo convertiría en un actor fundamental en la conformación de un cosmos como el que conocemos.

Según el Modelo Estándar de Física de Partículas –el que mejor explica cómo se comporta la materia, durante los primeros momentos de existencia del universo–, hace más de 13.000 millones de años, existía la misma cantidad de materia que de antimateria. Cada vez que una de estas partículas idénticas con carga opuesta chocaba con su antipartícula ambas se desintegraban provocando un estallido radiactivo. De haberse mantenido la igualdad tras el Big Bang, las partículas de materia habrían seguido chocando con sus contrarias, desprendiendo radiación y haciendo imposible la formación de galaxias o mundos como el que habitamos.

Sin embargo, como nos resulta evidente, uno de los dos tipos de partícula venció y fue posible la formación de planetas, humanos o papel para imprimir revistas. Algo des-

Fenómenos naturales

Los laboratorios subterráneos, y el LSC en particular, se dedican a la búsqueda de fenómenos nucleares y subnucleares, naturales, pero extremadamente inusuales. Dicha búsqueda necesita de un ambiente de muy bajo fondo radiactivo. Al igual que para poder ver la débil señal luminosa de una estrella necesitamos oscuridad, igualmente, no podemos detectar las señales de una desintegración nuclear que es muy inusual en presencia de un alto fondo de radioactividad natural. Esteruido de fondo es debido a los rayos cósmicos al incidir sobre la superficie de la Tierra y a la desintegración de los núcleos radioactivos presentes, en trazas, en todos los materiales.

Bajo tierra, concretamente bajo el Monte Tobazo, el flujo de rayos cósmicos se reduce en un factor de cien mil.

equilibró la pelea y, poco a poco, la materia ganó terreno y aniquiló a la antimateria. Aún no se sabe cómo ocurrió, pero los científicos creen que la clave puede estar en el neutrino. En algún momento del enfrentamiento, la diferente forma de interactuar del neutrino con materia y antimateria decidió el desenlace de aquel conflicto primigenio.

Si las teorías cosmológicas más aceptadas tienen razón, el neutrino sería una especie de superhéroe que salva al mundo, pero no quiere figurar. La curiosidad de los científicos, sin embargo, no va a permitir que el elemento fundamental en la guerra del Big Bang quede en el anonimato. De momento, se ha planteado que los neutrinos decisivos fueron unos parientes pesados de los que hoy conocemos que existían en los primeros momentos tras el gran estallido. Su desintegración se produciría dejando tras de sí solo materia, rompiendo así el estricto equilibrio inicial.

Según explica Cadenas, después



de varios meses calibrando el detector, ahora ya están listos para comenzar la búsqueda de la extraña desintegración. “La desintegración doble beta sin neutrinos, en principio, no está permitida por el Modelo Estándar”, explica. “Pero antes de empezar a buscarla intentaremos detectar otro tipo de desintegración, también muy rara, pero que ya se sabe que existe: la desintegración doble beta con dos neutrinos”, continúa. Cuando consigan registrar ese fenómeno, algo que significará que tienen muy bien controlado el ruido de fondo, algo esencial para lograr descubrimientos relevantes, irán a por la desintegración aún nunca vista. “Después, si en tres años no la encontramos, construiremos un detector más grande para seguir buscando”, asegura Cadenas.

Relevancia mundial

Tanto ANAIS como NEXT son experimentos que pueden tener resultados de relevancia mundial para la física. Ambos han tenido que salir adelante en una época de especiales dificultades para la

ciencia. En 2012, el LSC sufrió un recorte de 2,1 millones de euros y sus responsables temieron que sus trabajos se ralentizaran. En 2015, el Gobierno de España autorizó un nuevo presupuesto para alargar el convenio de colaboración

Esta infraestructura es, en la actualidad, por su extensión y características, el segundo laboratorio subterráneo europeo tras el laboratorio del Gran Sasso en Italia

entre el Ministerio de Economía y Competitividad, el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza, los gestores del LSC. Ese acuerdo proporcionará 9,7 millones de euros para seguir trabajando hasta 2021. Además, el equipo NEXT

recibió también 2,8 millones de euros de la Unión Europea como parte de una *Advanced Grant* del ERC (Consejo de Investigación Europeo). Gracias a este acuerdo, el Laboratorio Subterráneo de Canfranc contará con 9,7 millones de euros de los gobiernos central y autonómico para seguir investigando cinco años más, de momento, hasta finales de 2021. Los responsables de los proyectos suenan más optimistas que en los peores años de la crisis. José Ángel Villar, director asociado del Laboratorio Subterráneo de Canfranc y responsable de ANAIS, también ha logrado unos cristales de yoduro de sodio con la limpieza necesaria para alcanzar sus objetivos.

Tras años de dificultades, los investigadores que trabajarán en las profundidades del Tobazo parecen optimistas. El túnel de Canfranc ha sido protagonista en enfrentamientos cruentos como la Guerra Civil o la Segunda Guerra Mundial. Ahora es protagonista de otro campo de batalla, competitivo, pero nada sangriento. Ahora se combate en la frontera de la ciencia.



Si los orígenes del Ciemat se remontan a los primeros pasos de España en la energía nuclear, su impacto en el desarrollo de energías renovables ha sido igualmente determinante: los aerogeneradores ya tan habituales en el paisaje de la península ibérica y en tantos países tienen mucho que ver con el trabajo realizado en este organismo público de investigación dependiente del Ministerio de Economía, Industria y

Competividad. Energía solar y biocombustibles de segunda y tercera generación, sin olvidar la energía nuclear y la combustión limpia, completan la cartera de trabajo del centro. En el binomio del estratégico I+D, el Ciemat hace hincapié en la D, el desarrollo tecnológico, compaginándolo con actividades de investigación básica. Ramón Gavela es el director general de este centro.

Ramón Gavela, director del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

“El centro de gravedad del Ciemat es el desarrollo tecnológico, muy en contacto con las empresas”

■ Alicia Rivera / Periodista Miguel G. Rodríguez / Fotografía ■

Del conjunto de edificios e instalaciones científico-técnicas del Ciemat en Madrid, en la Ciudad Universitaria, Ramón Gavela debe conocer cada rincón a la perfección. Llegó a este centro hace 45 años, pasando al poco tiempo de becario a investigador en potabilización de agua de mar y, más tarde, a ingeniero de componentes mecánicos nucleares; en 1983 fue nombrado director de Tecnología del Ciemat.

Tras ocho años (1996-2004) en la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) como director de Ciencia y Tecnología, regresó a su casa profesional, el Ciemat, para desempeñar desde entonces cargos de alta responsabilidad.

Gavela (1948) es ingeniero electromecánico diplomado en ingeniería nuclear. “Cuando acabé la carrera, en 1970, empecé a trabajar en Bilbao, en una empresa de grúas, pero no me convenció, y me enteré de que había un curso en la Junta de Energía Nuclear (JEN), me dieron una beca

para realizar el curso de ingeniería nuclear y me entusiasmó el gran nivel y utilidad del mismo”, recuerda. “En aquellos años España era un yermo científico”, continúa. “Y la JEN era una especie de oasis con conexiones con EE UU y Europa, con profesionales que habían estado allí trabajando... merecía la pena y me conecté mucho con el mundo nuclear”. La JEN se convirtió después en el Ciemat y Gavela es, desde el pasado mes de diciembre, su director general.

PREGUNTA. El Ciemat tal vez sea uno de los centros de I+D españoles más injustamente poco conocidos. ¿Qué es este centro, cuáles son sus objetivos?

RESPUESTA. En el Ciemat prevalece la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico, lo que configura un centro con importantes instalaciones experimentales capaz de abordar proyectos multidisciplinares de envergadura. Pero también tenemos programas de investigación básica de excelencia, por ejem-

plo, en Física de Altas Energías y en Biología Molecular, siempre con un enfoque aplicado y con la vista puesta en la innovación de las empresas. Y no hay que olvidar el papel preponderante de nuestro centro en el soporte tecnológico a la energía nuclear del país y en las aplicaciones de la física nuclear, incluyendo el apoyo en metrología de radiaciones ionizantes a empresas e instituciones para garantizar cuestiones como las dosis radiológicas que puede recibir el personal profesionalmente expuesto y pacientes, tanto en diagnóstico como en tratamiento. Además, el Ciemat es el laboratorio nacional de fusión nuclear del programa Euratom, coordinando la investigación que se hace en nuestro país en esta materia. Resumiendo: somos un centro de investigación en energía, en medioambiente relacionado con la energía y en tecnología.

P. Son actividades de gran impacto socioeconómico.



Ramón Gavela ante una cavidad aceleradora operacional de radiofrecuencia del LEP, antiguo acelerador del CERN, que fue cedida por dicha institución europea al Ciemat y está expuesta en su recinto.

R. Sin duda. Y cada vez con más importancia, por ejemplo, en la relación energía/cambio climático.

P. Al combinar departamentos científicos con los de perfil tecnológico e industrial, ¿qué peso relativo tienen unos y otros?

R. El equilibrio es natural en un centro de investigación con una larga historia, pero el centro de gravedad de las actividades del Ciemat está en el desarrollo tecnológico, en la D de la I+D, y muy en contacto

“El Ciemat es el laboratorio nacional de fusión nuclear del Euratom, coordinando la investigación que se hace en nuestro país en esta materia”

con las empresas. Pero también tenemos I, y tenemos demostración (como fase industrial próxima a la comercialización) y servicios técnicos.

P. ¿Cuáles son los ejes de su labor?

R. Quiero enfocar mi trabajo hacia a los problemas prioritarios que tenemos, y uno de ellos, para mí el más acuciante, es el del personal. Tenemos una plantilla de unas 1.340 personas, pero aproximadamente 340 tienen contratos laborales

temporales, pese que muchos de ellos llevan ya años con nosotros. Hay que resolver este problema lo antes posible y estoy intentando abordarlo con una oferta pública de empleo razonable; la gente necesita estabilidad laboral. Es fundamental cuidar al personal y sus capacidades porque nuestro producto es el conocimiento y el conocimiento está en las personas. El segundo problema importante tiene que ver con la necesidad de agilizar nuestra gestión. El Ciemat es un organismo público autónomo de investigación, pero autonomía tiene relativamente poca, porque la normativa administrativa que tenemos encima, incluida la fiscalización previa del gasto (fundamentalmente de Hacienda), hace que este centro tenga muchísimas dificultades para llevar a cabo su gestión y su labor. Si queremos seguir compitiendo con los centros europeos similares al nuestro, no podemos hacerlo con una legislación administrativa que nos limita enormemente.

P. Usted conoce el Ciemat por dentro desde 1972. ¿Cómo ha cambiado?

R. Ha cambiado enormemente. El cambio fundamental se produjo en 1986, cuando dejó de ser la JEN, un centro de investigación exclusivamente nuclear, para convertirse en un centro de investigación en todas las energías, pero sobre todo orientado a las renovables y a otras energías limpias. Fue también un cambio de mentalidad, y coincidió con la entrada de España en la UE, lo que nos hizo volver la vista hacia Europa y hacia el aprovechamiento que el Programa Marco (ahora, Horizonte 2020) da a un país como el nuestro. Recuerdo que había una frase entonces que revela muy bien lo que significó aquel cambio: “Si no hay un cliente que pida, reclame o apoye lo que hacéis, no estáis haciendo algo relevante”. No quiere decir sólo que te compren la investigación en términos monetarios, puede ser otro tipo de apoyo, interés social... Era algo que nadie se planteaba seriamente en la mayo-

ría de los centros españoles a principios de los ochenta.

P. ¿Qué relación tiene ahora el Ciemat con el Consejo de Seguridad Nuclear?

R. En 1980, a partir de la JEN, se creó el CSN y, desde entonces, las relaciones han sido siempre muy fraternales y positivas. Realizamos trabajos con ellos, por ejemplo de investigación en seguridad nuclear, de formación de protección radiológica... Además, mantenemos una excelente relación institucional. Todo ello sin menoscabo de la relación regulado-regulador, pues el Ciemat está sometido, como es preceptivo, a la autoridad del CSN en materia de seguridad y protección radiológica en lo que afecta a nuestras instalaciones.

P. Presénteme los departamentos del Ciemat, ¿en qué trabajan?

R. Tenemos una estructura de departamentos científico-técnicos. El de Energía

“Ciemat está sometido a la autoridad del CSN en materia de seguridad y protección radiológica en lo que afecta a nuestras instalaciones”

es el que tiene más personal y más presupuesto, y abarca la energía nuclear, las renovables, la combustión limpia y la biomasa. Otro departamento es el de Medioambiente, que hace desarrollo tecnológico relacionado con los efectos medioambientales de la producción y utilización de la energía, intentando medir esos efectos y hacer desarrollos que los palien si son negativos. El departamento de Tecnología apoya al resto de los departamentos en informática, comunicaciones, ingeniería, fabricación, química analítica, materiales, etcétera. Pero, además, intenta crear sus propios productos. Por ejemplo, a través de

su división de electrónica, tiene líneas propias de investigación en física médica desarrollando técnicas para el diagnóstico de enfermedades como el cáncer, o nuevas tecnologías PET (siglas en inglés de Tomografía por Emisión de Positrones). Otra línea importante es la de nuevas tecnologías de aceleradores de partículas: la gran ciencia en Europa (como la del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, CERN) tiene grandes instalaciones que necesitan de una industria capaz de construir sus instrumentos de investigación. En España hay empresas que han ido adquiriendo esa experiencia y, gracias al Ciemat, se han colocado en buena posición para competir en Europa. Luego está el departamento de Investigación Básica y el de Fusión Nuclear.

P. En desarrollo de las energías renovables, el Ciemat ha jugado un papel muy relevante. ¿Sigue en esa línea?

R. Este sigue siendo el centro nacional de referencia en el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas. En renovables trabajamos en eólica, área en la que el Ciemat se metió por primera vez en España en los años ochenta. Las primeras máquinas experimentales que se produjeron en este país fueron lideradas por el Ciemat y hemos desarrollado muchos proyectos que han hecho que la industria española, por primera vez en un campo tecnológico, destaque a nivel mundial. El Ciemat promovió la creación de un centro de investigación específico, el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), en Navarra, dedicado a la energía eólica de alta potencia, y nosotros ahora nos centramos en la de baja potencia, que trata de llevar esta fuente de energía a la industria mediana y pequeña, e incluso a la vivienda.

P. ¿Y en fotovoltaica?

R. También trabajamos en ella desde mediados de los ochenta y hemos desarrollado muchos proyectos en colaboración con empresas. España creó un sistema industrial de fotovoltaica que tenía gran pujanza, pero ha decaído bastante desde

Nuclear contra el cambio climático

■ Texto **A. Rivera** | Periodista ■

Prescindir de la energía nuclear (de fisión) sería un duro golpe para combatir el cambio climático, afirma con rotundidad Ramón Gavela. Con tantos debates sociales, políticos y económicos, tantos argumentos a favor y en contra de esta fuente de energía, este ingeniero experto en nuclear señala, de antemano, que entiende a los que se oponen a su uso “porque ha sufrido unos accidentes importantes”. Pero se declara convencido de que “puede gestionarse de manera segura” y recalca que no solo sigue siendo necesaria, sino que lo será más aún para hacer frente al calentamiento de la Tierra inducido por el uso masivo de los combustibles fósiles. “Fukushima pudo haberse evitado y con las nuevas normas, más aún”, apunta Gavela. “El ser humano tiene la capacidad de controlar la energía nuclear y llegará a gestionarla con casi total seguridad”. Y recuerda que el tremendo *tsunami* de 2011 provocó por sí mismo muchísimos más daños que el accidente de la central de Fukushima.

Pero, ¿sería rentable la explotación de la energía de fisión si la industria del sector tuviese que hacer frente a los costes de los accidentes y el impacto de los residuos a largo plazo? “He hecho algunos cálculos y, con un concepto solidario de asunción de los accidentes por todo el sector nuclear mundial (el impacto económico de todos los accidentes registrados hasta ahora si se pagan, los pagamos entre todas las empresas nucleares), esos costes supondrían un encarecimiento del 3% al 5% sobre el coste actual de esta energía”, explica Gavela. Esto influiría en el coste, sí, “pero, no tanto. Por supuesto, es mucho más ba-

rato evitar los accidentes y se puede hacer”, añade.

Su confianza en la seguridad de esta fuente de energía reside en la capacidad tecnológica para mejorarla y limitar los riesgos, pero también en el de los sistemas reguladores para controlarla, “como el CSN en España”, destacando que “son muy competentes”. Reconoce que la gestión de la energía nuclear ha carecido de la transparencia necesaria, “pero es más el pasado que la realidad actual. Ahora no creo que se pueda acusar de oscurantismo al sector”.

Respecto al problema del cambio climático, “la idea de sustituir la nuclear por renovables es lo peor que se puede hacer, porque terminas quemando carbón, como en Alemania, y así no combates el calentamiento”. En su opinión, lo que hay que hacer es cambiar la energía fósil por renovables. Reconoce que, cuando empezaron a desarrollarse estas energías, tuvo serias dudas sobre su eficacia, “pero han resultado ser una realidad –y lo he reconocido en

público varias veces– gracias a los que las pusieron en marcha y a los ecologistas: el año pasado hubo más nuevas instalaciones de renovables en el mundo que de energía convencional; es algo imparable”.

¿Y la alternativa de la fusión nuclear, en la que el Ciemat tiene una larga trayectoria de investigación? “La fusión tiene que demostrar que es capaz de producir energía de modo rentable y, además, exigirá un tiempo de implantación. Creo que la fisión nuclear será necesaria durante bastante tiempo”, recalca que una nueva generación de esta tecnología seguramente tendrá mucho más que aportar. ▀



2009, con la crisis económica, el déficit tarifario y la restrictiva política energética. Las energías renovables se dejaron de apoyar y han sufrido una merma importante. Aún así, nuestras empresas siguen defendiéndose bastante bien.

P. Ha citado antes también la biomasa entre las líneas de trabajo del Ciemat.

R. Tenemos dos líneas principales: la de los biocarburantes y la de biomasa sólida. Hacemos investigación en biocarburantes de segunda y tercera generación, que aprovechan biomasa residual como residuos forestales, agrícolas, urbanos... Hemos desarrollado algunas patentes y tenemos una plan piloto en Valencia, con una

empresa que está produciendo bioetanol a partir de la parte orgánica de los residuos urbanos. También trabajamos en biomasa sólida, en la generación de calor a partir de la madera de árboles específicos o a partir de residuos forestales.

P. Una de las joyas del Ciemat es la Plataforma Solar de Almería.

R. Es otra línea de investigación que ha hecho –y hace– que España sea el primer país del mundo en desarrollo tecnológico de concentración solar. La Plataforma Solar de Almería sigue trabajando a pleno rendimiento.

P. También destaca el Ciemat en Fusión Nuclear. ¿Participa en el proyecto ITER?

R. Sí, tenemos un grupo de ingenieros que está desarrollando y construyendo, junto con algunas empresas, componentes para el ITER. El programa español de fusión nuclear, que coordina el Ciemat, se ha basado tradicionalmente en la física del plasma, sobre todo con el reactor TJII que tenemos aquí. Pero, esta máquina lleva ya 17 años funcionando y se acaba de terminar otra del mismo tipo (*stere-llator*), pero mayor, en Alemania y, lógicamente, debemos desplazar parte de nuestra investigación a ella.

P. ¿No debería el Ciemat, con toda la experiencia del TJII, planear una nueva máquina de fusión?

R. Desde luego que nos encantaría y sería coherente. Pero es fácil responder esta pregunta: en este momento, con los medios disponibles, no cabe pensar en construir una nueva máquina de fusión en el Ciemat.

P. ¿Seguirá activo el programa de fusión en este centro?

R. Sí. Seguimos haciendo física con el TJII y con otras instalaciones europeas. Nos estamos reconvirtiendo y hemos empezado a dar peso al desarrollo tecnológico. En fusión, además de la física necesaria para lograr que el reactor sea estable, se precisan unos materiales excepcionales porque tienen que ser muy resistentes a la radiación neutrónica altísima que se genera en el reactor. El Ciemat está, por ello, muy metido en un programa paralelo a ITER, que denominamos *Broader Approach*, y que lidera

Futuro

–Usted ha destacado el problema de la falta de autonomía en la gestión.

–El problema de los presupuestos escasos, con toda su importancia, no es el peor. Algunas normativas y la fiscalización previa del gasto están poniéndonos tantas trabas, que nos dificultan la investigación. Para un centro como el Ciemat es difícil hacer una gestión eficaz al perder la autonomía, lo que puede deteriorar el organismo y paralizar proyectos estratégicos.

–Póngame un ejemplo...

–El año pasado quisimos participar en un proyecto europeo de investigación en seguridad nuclear de la OCDE, que une a varios países para trabajar sobre recintos de contención, producción de gases, etcétera. Para participar tenemos que abonar una cuota anual de 9.000 euros y no pudimos hacerlo porque, debido al cierre anticipado de los presupuestos, no se nos autorizó ese pago. Los otros socios iniciaron el proyecto y nos dieron la opción de adherirnos después. Este año vamos a reiniciar el proceso, que llevará meses, para poder pagar la cuota, pero corremos el riesgo de perder el proyecto. ¡Y son 9.000 euros al año!

–Si se superan estos graves escollos, ¿cómo ve usted el futuro del Ciemat?

–Estamos bien posicionados en el entorno internacional y trabajamos en un campo muy necesario. Nadie duda de que las energías renovables, la nuclear y la combustión limpia son fundamentales. España es un país con recursos renovables muy abundantes y desarrollado tecnológicamente, con capacidad de influir en las nuevas tecnologías energéticas. Por lo tanto, veo el Ciemat con un futuro enorme si le dejan trabajar, si somos capaces de resolver los problemas que tenemos, tanto de presupuesto como de inestabilidad de personal como de gestión ágil. El futuro del Ciemat es impresionante...

Japón, dedicado al desarrollo de nuevos materiales y tecnologías de robotización.

P. Usted ha citado los proyectos de Física de Altas Energías. ¿En qué se especializa el Ciemat?

R. Tenemos mucha tradición en esto, especialmente por la participación en los programas del CERN. Nuestra división es experimental y participamos en sus detectores suministrando equipos que se construyen aquí, y también para los aceleradores, como el LHC. Luego, cuando están funcionando los experimentos, participamos en el tratamiento y análisis de los resultados. Y también trabajamos en equipos de Astrofísica, dentro del proyecto AMS, construyendo, por ejemplo cámaras Cherenkov y detectores de partículas para satélites, tratando de detectar la materia oscura.

P. ¿Por qué mantiene una división de Biología Molecular un centro multidisciplinar como este, cuando existen centros específicos?

R. Es una pregunta lógica que a veces se ha planteado la dirección del Ciemat. Mi opinión es que donde haya excelencia hay que mantenerla y los grupos de investigación en biología que tenemos aquí son excelentes. Esta división procede de la época de la JEN, cuando había mucho interés en conocer los efectos de la radiación en los seres vivos. Ahora tenemos un grupo de biología muy bueno, que trabaja en cáncer y en enfermedades raras; tenemos, por ejemplo, un programa que esta ya en fase de ensayos clínicos con pacientes para curar la anemia de Fanconi mediante ingeniería genética.

P. Otra actividad histórica del centro es el apoyo al sistema de energía nuclear español. ¿En qué consiste?

R. Nuestra actividad en I+D nuclear sigue siendo importante, aunque ya

no es mayoritaria. Seguimos siendo el centro de referencia para investigación nuclear, en colaboración con el CSN, Enresa, ENUSA y empresas eléctricas. Hacemos investigación en residuos radiactivos y en innovación nuclear: la cuarta generación, que ha de tener mayor seguridad intrínseca, debe utilizar mejor el uranio y tratar de generar menos residuos, o incluso eliminarlos mediante la transmutación.

P. Dentro del capítulo nuclear: ¿Han concluido las labores de descontaminación de algunas instalaciones aquí en el recinto del Ciemat en Madrid?

R. Tenemos un proyecto de limpieza radiológica desde hace más de diez años, que está en su fase final. Prácticamente se ha terminado la limpieza física y estamos iniciando el proceso de caracterización para demostrar que el centro está ya limpio, de acuerdo con las especificaciones del CSN. Este es un tema que suele suscitar inquietud entre la población y, por ello, me gustaría dejar claro que las contaminaciones que hemos limpiado han sido de un nivel relativamente bajo y que en ningún momento han producido daño significativo a los trabajadores y, mucho menos, a la población exterior.

P. El Ciemat montó hace unos años unos centros satélites en diferentes comunidades autónomas. ¿Siguen funcionando?



En opinión de Ramón Gavela, España es un país con abundantes recursos en energías renovables y desarrollado tecnológicamente, de manera que tendrá capacidad de influir en las nuevas tecnologías energéticas, campo en el que está el futuro del Ciemat.

R. Algunos han ido hacia arriba y otros, menos. Para investigación en informática distribuida se creó el centro de Extremadura, en Trujillo, y sigue funcionando, con personal muy ajustado, pero con buenas infraestructuras y proyectos. El centro de investigación en derecho medioambiental, en Soria, se mantiene aunque solo con cuatro o cinco personas. También funciona muy bien el centro de Barcelona, dedicado a estudios sociotécnicos.

P. ¿Qué impacto ha tenido la crisis y la caída de los presupuestos de I+D en el Ciemat? Las subvenciones estatales para este centro pasaron de unos 96 millones de euros en 2009 a 66 millones en 2010.

R. Y el año siguiente, a 60 millones. Recientemente nos han subido seis millones, pero nos han quitado después parte de ese dinero... Es un hachazo brutal que nos ha obligado a hacer un esfuerzo enorme de ahorro y eficiencia en la gestión, intentando mantener lo más útil que tiene el Ciemat que es el conocimiento de las personas. Hemos intentado mantener los equipos de investigación pero a costa de prescindir de inversiones, que hubieran sido muy necesarias, para renovar edificios e instalaciones, o para poner en marcha nuevas líneas de investigación. Vamos aguantando, pero esto tiene un límite y si esto sigue así... Me llegan,

por ejemplo, informes de que hay edificios con los sistemas de calefacción a punto de fallar y no tenemos margen para atender esas necesidades y solucionarlo. ¿Cómo es posible que hayamos llegado a esto? Hacemos lo que podemos con el presupuesto escaso que tenemos para afrontar nuevas actividades e infraestructuras, pero, si no recuperamos una parte de la inversión, lo vamos a pasar mal.



Una subdirección con nombre sencillo, pero de contenido múltiple

Su nombre puede invitar a cometer el error de pensar que nos encontramos ante el equipo humano del Consejo de Seguridad Nuclear encargado, sin más, de proteger el medio ambiente ante las radiaciones ionizantes. ¡Nada más lejos de la realidad! La propia subdirectora de Protección Radiológica Ambiental, Lucila Ramos, nos explica que se trata de “una subdirección de nombre simplificado, pero de contenido múltiple y complejo”. Y es que si se pasea por la última

planta del organismo regulador, puede escuchar hablar de temas tan variopintos como el Plan de Rehabilitación de Palomares tras el accidente de las bombas atómicas en 1966, el proceso de desmantelamiento de las centrales nucleares, que tantas portadas ha acaparado tras la decisión de cierre de Santa María de Garoña, o la importancia de prevenir altas concentraciones de radón en las viviendas. ■ Texto **Vanessa Lorenzo** | Área de Comunicación del CSN | ■

Quizás al lector le resulte ajeno el campo de la Protección Radiológica Ambiental, pero está más próximo de lo que piensa. ¿Sabía que existen programas de vigilancia para asegurar que la lechuga, la leche y en general los alimentos que consumimos no presentan contaminación radiactiva? ¿Conoce el mapa en el que puede comprobar si la zona en la que reside presenta más o menos radiación natural? ¿Sabe quién controla

los vertidos al medio ambiente de las centrales nucleares?

El trabajo de esta Subdirección está más presente en nuestras vidas cotidianas de lo que podíamos imaginar inicialmente. Físicos, químicos, ingenieros y biólogos, este es el perfil de los 32 técnicos que, junto a seis administrativos, conforman el equipo de una Subdirección articulada en torno a cinco áreas muy diversas (Instalaciones del Ciclo y Desmantelamiento, Residuos

de Baja y Media Actividad, Radiación Natural, Vigilancia Radiológica Ambiental y Evaluación de Impacto Radiológico), pero orientadas todas a un fin último: proteger a las personas y al medio ambiente de las radiaciones ionizantes.

Las centrales nucleares y otras instalaciones nucleares y radiactivas generan diariamente residuos líquidos o gaseosos que se vierten al exterior de forma controlada. Son los técnicos de la Subdirección los en-



La Subdirección de Protección Radiológica Ambiental está formada por una treintena de profesionales con amplia experiencia y alta cualificación.

cargados de velar para que dichos vertidos no supongan un impacto radiológico en el medio ambiente.

Existen, además, residuos sólidos de media y baja actividad procedentes de esas instalaciones y de hospitales, o laboratorios, que una vez acondicionados son trasladados a un almacén central en El Cabril (Córdoba), para permanecer confinados durante los más de 300 años que pueden

transcurrir hasta que su radiactividad decae y dejan de ser nocivos. El control de estos y de otros procedentes de proyectos del ciclo del combustible nuclear, como la minería y la producción de concentrados de uranio, recae sobre esta subdirección.

También entre sus competencias se encuentra el control de la vigilancia radiológica del medio ambiente que los titulares realizan alrededor de sus instalaciones y

la que el propio CSN lleva a cabo en todo el territorio nacional a través de una red de estaciones automáticas y una red de muestreo y análisis.

Radiación natural

También existen radiaciones de origen natural, procedentes de la corteza terrestre y del espacio exterior, a las que estamos expuestos por el simple hecho de vi-

Entrevista a Lucila Ramos

“Preparación, dedicación y entusiasmo definen a todos los profesionales de este equipo”

Lucila Ramos inició su singladura profesional en un centro de investigación nuclear en Alemania. Dos años después se trasladó a la Junta de Energía Nuclear, desde donde se incorporaría al CSN en sus comienzos. Tras desempeñar diversas funciones, como jefe de proyecto y jefe de área entre otras, en 2003 fue nombrada subdirectora general de Protección Radiológica Ambiental, puesto que ocupa desde entonces.

PREGUNTA. Podemos decir que vio nacer a este organismo, que el pasado mes de abril celebró su 37 cumpleaños. Echando la vista atrás ¿qué momentos destacaría de su primera trayectoria en el CSN?

RESPUESTA. Formo parte del equipo de técnicos que “abrió las puertas del CSN” cuando empezó a funcionar, allá por 1982, así que imagínese la multitud de situaciones que hemos tenido que afrontar.

Una de las actuaciones más interesantes de esa época temprana fueron las primeras autorizaciones para el funcionamiento de las plantas de fabricación de concentrados de uranio Elefante y Quercus. Resultó todo un reto porque no existía mucha normativa en la materia y tuvimos que hacer camino al andar; fue un trabajo ímprobo pero supuso una experiencia inestimable para afrontar los múltiples temas novedosos que hemos tenido que abordar después.

Recuerdo también la vigilancia ambiental tras el accidente de Chernóbil y el incidente de Acerinox, suceso que fue el germen del excelente sistema de control de la radiactividad en las industrias de reciclado de metales.



Desde 2003 como subdirectora de Protección Radiológica Ambiental, Lucila Ramos, está al frente de un gran equipo multidisciplinar.

Dada la diversidad que presentaban entonces las centrales nucleares en el ámbito de los efluentes radiactivos, consideramos necesario adoptar un sistema homogéneo para su limitación, vigilancia y control. Concluir este proceso requirió más de seis años en los que también se revisaron los programas de vigilancia radiológica ambiental. Fue para mí una gran satisfacción que todas las instalaciones dispusieran de un Manual de Cálculo de Dosis en el Exterior, documento clave para la protección del público y el medioambiente.

Especialmente complejo fue también el establecimiento en todo el territorio nacional de la red de vigilancia radiológica ambiental del propio CSN, gracias a lo cual contamos hoy con una red de estaciones de muestreo integrada por 21 laboratorios, que vigila el aire, las aguas y determinados alimentos; además de otra red de estaciones automáticas que miden en tiempo real los niveles de radiactividad.

(Sigue en la página 22)

(Viene de la página 21)

P. Y de su etapa como subdirectora ¿qué hitos destacaría?

R. Uno de los primeros aspectos que abordé fue el control de la exposición a la radiación natural, con un ambicioso programa sobre las industrias NORM; hemos desarrollado normativa, de especial importancia para un sector no familiarizado con las radiaciones, realizado campañas de medidas de radón en edificios y determinado las zonas con mayor riesgo.

También destacaría la modificación en 2008 de El Cabril para albergar residuos de muy baja actividad, y más recientemente, las autorizaciones de nuevos proyectos de fabricación de concentrados de Uranio. El control del desmantelamiento de la central nuclear de José Cabrera, a pesar de experiencias previas (Vandellós, instalaciones del Ciemat), ha supuesto un reto importante.

Especial mención merecen los planes de rehabilitación de Palomares, las campañas de vigilancia tras el incidente de las partículas de Ascó y el seguimiento de la incidencia en España del accidente de Fukushima. Dada la importancia de la información, hemos puesto a disposición del público una aplicación con datos sobre toda la vigilancia radiológica ambiental en nuestro país.

La reconstrucción histórica de las dosis debidas a los vertidos radiactivos para el estudio epidemiológico, realizado en el entorno de las instalaciones, fue muy importante y un orgullo presentarlo personalmente en la Academia de Ciencias de EEUU, como referencia para un estudio similar americano.

P. Dirige un equipo multidisciplinar, que trabaja en 5 áreas diversas. ¿Cómo de complejo resulta el engranaje del día a día?

R. El trabajo de la Subdirección es muy motivador y requiere preparación, dedicación y entusiasmo lo que, junto al proverbial buen ambiente del equipo, hacen que todo resulte más

fácil. Esos elementos son compartidos por los excelentes profesionales que forman mi equipo, tanto el personal administrativo como los especialistas en diversas disciplinas, con mucha experiencia pero con gran interés en estar al día, acostumbrados a dar respuesta a temas complejos en los que a menudo está todo por hacer. Nuestros expertos son un referente dentro y fuera de España. También los técnicos que se han incorporado más recientemente tienen una capacidad y disposición loables, así que el futuro está garantizado.

Otro elemento clave son los mecanismos internos que hemos establecido para tratar temas transversales que surgen a menudo y afectan a varias áreas.

P. ¿Cuáles son los principales retos a los que se enfrenta su subdirección?

R. La Directiva 2013/59 sobre normas básicas de protección radiológica supone cambios relevantes en el control de la radiación natural, requiriendo un Plan Nacional para el radón y es necesario que completemos los aspectos radiológicos del mismo. También es preciso consolidar un sistema efectivo de supervisión de las industrias NORM.

En el desmantelamiento hay que completar la normativa, considerando nuestra experiencia y las propuestas del foro de reguladores nucleares europeos. Deberemos afrontar también la liberación de terrenos tras la clausura de las instalaciones, que no se ha completado en ninguna instalación nuclear.

La autorización de desmantelamiento y cierre, requerida en 2014 para las instalaciones de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos, exige definir, para instalaciones como El Cabril, los aspectos de seguridad y protección radiológica en esta fase y durante la etapa de control y vigilancia posterior al cierre.

vir en este planeta. Dependiendo del lugar en el que estemos, los niveles pueden ser bien diferentes, por ejemplo, en algunas zonas de India la radiactividad es 10 veces mayor que la media europea.

Pero para hablar de radiación natural no hay que irse muy lejos: en nuestras propias casas también puede existir radiactividad debido al radón. Un gas procedente de la desintegración del uranio que contienen las rocas y cuyos niveles dependerán de la ubicación de la vivienda, los materiales con los que se haya construido y de nuestra forma de vida. Esta Subdirección

cuenta también con un equipo de expertos encargados de controlar la exposición a la radiación natural.

En último lugar, pero no por ello menos importante, destacar el trabajo del equipo que cada día se encarga de coordinar las actividades de supervisión y licenciamiento de instalaciones como El Cabril, el Ciemat, las centrales nucleares en desmantelamiento (Vandellós I y José Cabrera), las instalaciones del ciclo o los proyectos relacionados con la radiación natural (NORM) como el Hondón en Cartagena o los fosfoyesos de Huelva.

Tras haber desgranado el entramado de tareas que esta Subdirección lleva a cabo, nos preguntamos cómo se logra un perfecto engranaje con áreas tan diversas. Dicen que para que suene bien una orquesta se necesitan buenos músicos y un gran director. En el caso de la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental, ambas variables hacen que la obra sea todo un éxito. La encargada de dirigir en esta orquesta es Lucila Ramos, una abulense funcionaria de la Escala Superior del Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN desde 1984. 

Hacia un Plan Nacional contra el radón en España

El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco, y el responsable de unas 1.500 muertes al año en España. Para reducir la carga que la exposición a este agente cancerígeno supone para la salud de la población, la Directiva europea 2013/59/Euratom requiere que los Estados miembros pongan en marcha planes nacionales de actuación contra el gas. El Plan Nacional contra el radón debe implantarse en nuestro país en 2018. En espera de ello, varios elementos fundamentales para poner en marcha este Plan se han finalizado ya

o se encuentran en fase avanzada de desarrollo, gracias a la labor del Consejo de Seguridad Nuclear y de otros actores públicos e institucionales.

■ Texto **Marta García-Talavera San Miguel** | Jefa de Área de Radiación Natural | **Francisco Javier López** | Becario del CSN | **Mª Teresa Sanz Alduán** | Coordinadora técnica de Protección Radiológica del Público y V.R.M.A. | **Lucila Ramos Salvador** | Subdirectora de Protección Radiológica Ambiental | **María Fernanda Sánchez Ojanguren** | Directora técnica de Protección Radiológica | ■

El radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo de origen natural que se produce de manera continua en las rocas, en los suelos y en los materiales de construcción, a partir de la desintegración del radio-226 (^{226}Ra) que estos contienen. Desde ellos emana y pasa al aire que llena los poros y fisuras del medio. Al aire libre, este gas suele encontrarse en concentraciones bajas, en torno a 10-20 Bq/m³, pero tiende a acumularse en los edificios, donde puede alcanzar niveles elevados, que representan un riesgo para la salud.

Desde 1998, el radón está clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) como carcinógeno de primera categoría (aplicable cuando existen pruebas suficientes de carcinogenicidad en humanos). La Organización Mundial de la Salud (OMS) lo reconoce como la segunda causa de cáncer de pulmón en la población después del tabaco y, en Europa, es responsable de un 9% de las muertes por este tipo de cáncer [1]. En España, en particular, se estima que el radón es causante de 1.500 muertes anuales [2].



Organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) o la OMS abogan por programas integrales a nivel nacional para reducir el riesgo que supone el radón para la salud de la población. En esta línea, la Directiva europea 2013/59/Euratom establece que los estados miembros deben poner en marcha planes nacionales de actuación contra este agente cancerígeno.

En España, el Plan Nacional deberá ponerse en marcha en 2018. Según lo acordado en el marco de transposición de la Directiva 2013/59/Euratom, el Comité responsable de su preparación estará formado por representantes del CSN, de los Ministerios de Energía, Fomento y

Trabajo, de las CC.AA y de las entidades locales, y coordinado por el Ministerio de Sanidad. No obstante, hay ya un largo camino recorrido en la protección frente al radón en España y varios de los elementos que deben integrar el Plan están ya finalizados o en fase avanzada de desarrollo. Estos avances, así como la importancia de poner en marcha un plan que coordine e impulse la labor y las iniciativas de los distintos actores, se resumen en este artículo.

Riesgos del radón para la salud

Los efectos carcinogénicos del radón se deben, no a la exposición directa al propio gas, sino a sus descendientes de vida corta (inferior a 30 minutos). Estos se producen por la desintegración radiactiva del radón presente en el aire. Al ser sólidos y estar cargados eléctricamente, se adhieren a los aerosoles en suspensión, salvo una pequeña fracción de los mismos, que permanece en forma no ligada. Cuando respiramos, los descendientes de radón se depositan en las distintas regiones del tracto respiratorio, en función del diámetro aerodinámico

de las partículas a las que van asociados y, con el tiempo, se desintegran emitiendo partículas alfa y beta; las más dañinas son las alfa emitidas por el polonio-218 y el polonio-214.

La primera observación de un exceso de mortalidad por cáncer de pulmón debido al radón fue descrita en 1879, en los trabajadores de minas subterráneas del sudeste de Alemania [3]. Varias décadas más tarde, la misma asociación se confirmó en un estudio referido a los mineros de Checoslovaquia [4]. Gran parte de la información sobre los efectos carcinogénicos del radón proviene de distintos estudios epidemiológicos puestos en marcha a partir de la II Guerra Mundial, a fin de valorar los riesgos de la exposición al radón en las minas subterráneas. Las principales cohortes de mineros en las que se fundamentan estos estudios se describen en el informe Beir IV [5].

Adicionalmente, desde los años 80, un gran número de estudios se centraron en las exposiciones residenciales al radón. Su objetivo era investigar si, aún a concentraciones moderadas (como las que se encuentran habitualmente en las viviendas), la exposición al radón incrementa el riesgo de cáncer de pulmón. Estos estudios residenciales se agruparon en tres análisis independientes que analizaron, respectivamente, los datos obtenidos en Europa [1], [6], Norteamérica [7-8] y China [9].

Los resultados de los tres análisis agrupados concuerdan en cuanto a los riesgos de cáncer de pulmón derivados

de la exposición residencial al radón. Conjuntamente, demuestran que el radón causa un número sustancial de casos de cáncer de pulmón en la población general, y proporcionan estimaciones directas de la magnitud del riesgo. Otra conclusión importante de estos estudios residenciales es que el riesgo es mucho mayor en fumadores (hasta 25 veces comparado con una persona que nunca ha fumado), debido al efecto sinérgico de radón y tabaco. En la Tabla 1 se cuan-

Desde los años 80, numerosos estudios se centraron en las exposiciones residenciales al radón. Su objetivo, investigar si las concentraciones moderadas incrementan el riesgo de cáncer de pulmón

tifica la mortalidad acumulada debida al radón para fumadores y no fumadores a distintas concentraciones de radón.

El análisis combinado de los estudios agrupados residenciales y de la evidencia epidemiológica procedente de la cohorte de mineros, llevaron a la ICRP a modificar el coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento producido por la exposición al radón. En 2009, la Comisión propuso un nuevo valor de 5×10^{-4} WLM-1 [10], que prácticamente duplica el valor recomendado en su publicación 65 [11].

La primera recomendación europea para limitar la exposición del público al radón en ambientes interiores fue publicada en 1990 (Recomendación 90/143/EURATOM [12]).

Marco regulador

Aunque la Directiva 96/29/EURATOM, emitida años más tarde, excluía explícitamente la exposición al radón en las viviendas, el CSN la incluyó como uno de los aspectos a desarrollar dentro de su *Plan de actuación para el control de la exposición a las fuentes naturales de radiación*, aprobado por el Pleno en febrero de 2002.

La Directiva 96/29/EURATOM incorporaba, no obstante, el control de las exposiciones al radón asociadas a determinadas actividades laborales. La Directiva se transpuso en España mediante el Reglamento de Protección Sanitaria Contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI, por sus siglas en inglés) aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio. En particular, en su título VII, el Reglamento incluye el control de actividades laborales con especial exposición a la radiación natural. Este título VII se desarrolló en 2011, mediante la Instrucción IS-33 del CSN [13], en la que se establece el nivel de referencia para la exposición ocupacional al radón y se determinan las medidas de control a las que debe quedar sujeta la actividad en caso de superación de este nivel.

Los requisitos relativos al radón de la nueva Directiva 2013/59/Euratom de normas básicas de seguridad –en fase de transposición a la legislación española– suponen ampliar enormemente el alcan-

	0 Bq/m ³	100 Bq/m ³	400 Bq/m ³
Fumadores	10	12	16
No fumadores	0,4	0,5	0,7

Tabla 1. Mortalidad acumulada (%) antes de los 75 años por exposición al radón Tomada de Darby et al. (BMJ, 2005).

ce y el nivel de protección del actual marco regulador. Para la exposición ocupacional, la Directiva reduce el nivel de referencia a 300 Bq/m³ (el actual nivel de referencia es de 600 Bq/m³). Además, incluyen por primera vez la exposición doméstica al radón. En relación con ello, la Directiva exige a los Estados miembros tomar medidas activas y habilitar instrumentos para proteger a sus habitantes contra los efectos adversos del gas, que deben plasmarse en forma de planes nacionales de actuación.

Las dificultades en la práctica para transponer los requisitos de la Directiva concernientes al radón fueron objeto de dos *workshops* de HERCA (Asociación Europea de Autoridades competentes en Protección Radiológica). En ambos, el CSN formó parte del comité de programa y actuó como punto de contacto para el resto de organismos nacionales. Como resultado de estos *workshops*, se elaboró un documento de posición de HERCA sobre radón [14], que refleja el entendimiento común sobre el alcance de la Directiva y los retos que esta conlleva, y da recomendaciones para su transposición a las legislaciones nacionales.

Futuro Plan Nacional contra el radón

La obligación de poner en marcha un Plan contra el radón en España se recogerá, previsiblemente, en el RPSRI, actualmente en revisión. Según requiere la Directiva 2013/59/Euratom, el objetivo fundamental del Plan es el de reducir el número de cánceres en la población debidos al radón. Para ello es necesario un enfoque integral, que incluya las viviendas, los lugares de trabajo y los edificios de uso público, así como todas las posibles vías de entrada de radón (el suelo, los materiales de construcción y el agua corriente) a los espacios cerrados.

La consecución de ese objetivo requiere articular una serie de objetivos específicos con un amplio alcance: fomentar el



Figura 1 Las cuevas turísticas son uno de los sectores sujetos al cumplimiento del título VII del RPSRI y de la Instrucción IS-33 del CSN.

cumplimiento de la legislación; implantar políticas de apoyo; coordinar iniciativas a nivel estatal, autonómico y local; transferir el conocimiento; concienciar a la población; e impulsar la iniciativa privada.

El Ministerio de Sanidad Asuntos Sociales e Igualdad asumirá la coordinación del Plan, de acuerdo con sus competencias en materia de salud pública. Si bien este Ministerio aún no ha puesto en marcha acciones coordinadas del conjunto de actores que deben intervenir en el Plan, se han completado ya, o están en fase de desarro-

llo avanzado, una serie de elementos imprescindibles para la consecución de este. Algunos de los más relevantes se recogen en los siguientes apartados de este artículo.

Por otro lado, el grado de concienciación de la población sobre el riesgo asociado al radón ha aumentado en los últimos tiempos gracias a un mayor interés mediático, aunque discontinuo, por este tema. Tanto la web del CSN como la de la Asociación Española contra el Cáncer y las de otras ONG ofrecen información específica sobre el radón. Ya en 1995, el CSN publicó, junto con la Universidad de Cantabria, el video divulgativo “Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa” [15], que se ha reeditado en diversas ocasiones.

En un ámbito más especializado, el CSN participa habitualmente en congresos de sociedades profesionales afines para divulgar el tema, y ha publicado artículos en revistas científico-técnicas. También, a lo largo de los años, se han venido celebrando jornadas sobre radón, muchas de ellas organizadas o apoyadas por el CSN. Asimismo, cabe destacar que las universidades y el CSIC están ejerciendo una importante labor de divulga-

La obligación de poner en marcha un Plan contra el radón en España se recogerá, previsiblemente, en el RPSRI, en revisión. Según requiere la Directiva 2013/59/Euratom, el objetivo del Plan es el de reducir el número de cánceres en la población debidos al radón

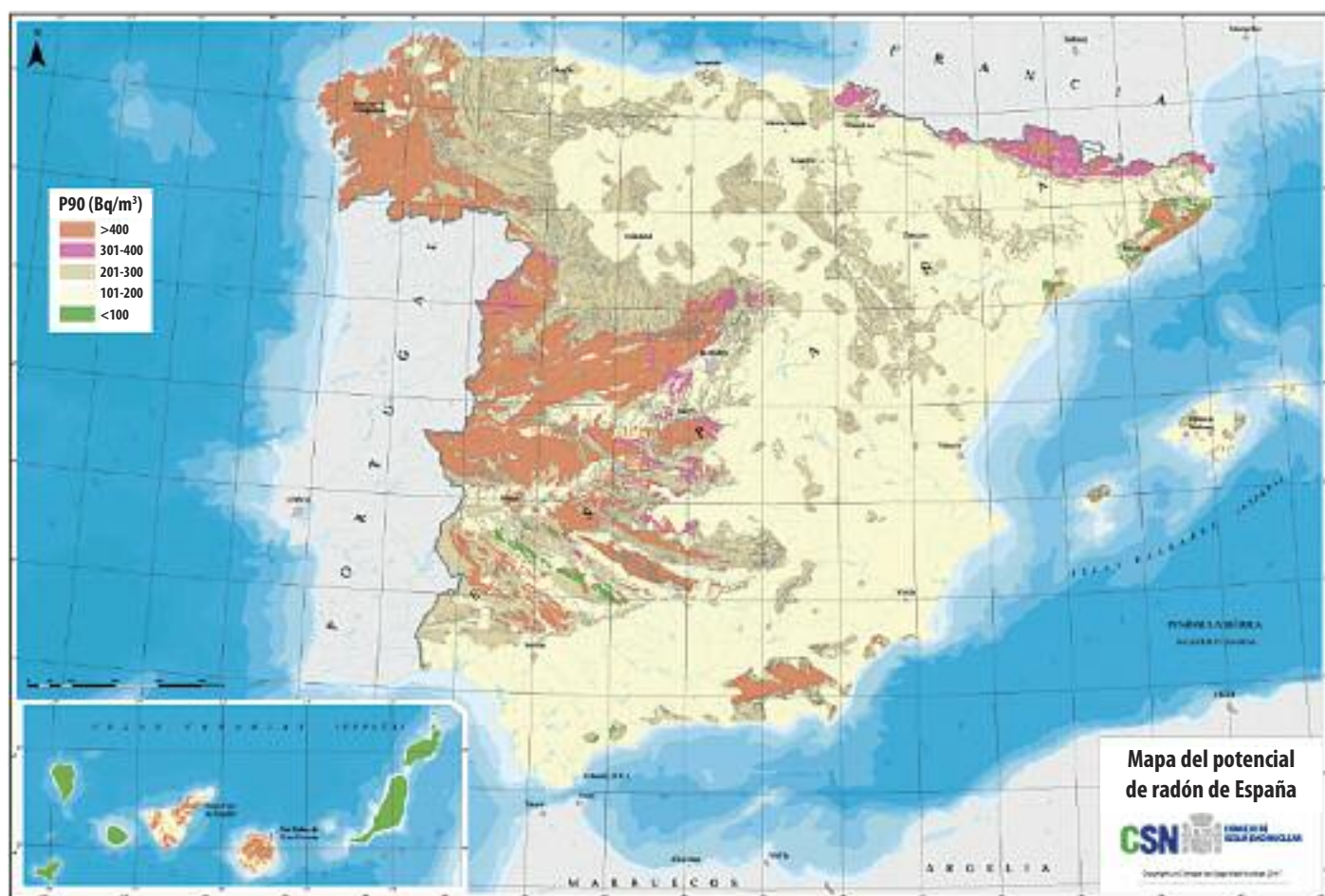


Figura 2. Mapa del potencial de radón de España (Cartografía del potencial de radón de España, CSN, 2017).

ción técnica. En el último año, se han organizado cursos en Castilla y León, Madrid, Extremadura y Canarias; y la Universidad de Cantabria está tramitando dos cursos de formación universitaria especializada. Asimismo, diversos municipios han promovido charlas divulgativas, recurriendo a algunas de las empresas especializadas que están emergiendo en el sector.

Hay, en resumen, una creciente actividad en torno al radón, que el Plan Nacional debe canalizar y potenciar.

El mapa del radón en España

Como parte fundamental del plan nacional, es necesario identificar “aquellas zonas en las que se espere que el promedio anual de concentración de radón en un número significativo de edificios supere el nivel de referencia nacional

correspondiente” (Directiva 2013/59, Artículo 103, apartado 3). Al dirigir los recursos disponibles prioritariamente a la población más expuesta, se consigue no solo proteger a los individuos sometidos a un mayor riesgo, sino también una mayor reducción (en términos globales) de las dosis por radón que recibe el conjunto de la población.

Desde hace décadas, distintos países utilizan el concepto de ‘zonas afectadas o propensas al radón’ (que ahora incorpora la Directiva), como un instrumento eficaz para optimizar la exposición al radón de su población. El texto legal de la Directiva evitó, no obstante, la utilización expresa del término ‘zonas propensas al radón’ por sus posibles connotaciones negativas. En general, la denominación que la mayoría de Estados miembros (entre ellos España) vie-

nen adoptando para referirse a ellas es el de ‘zonas de actuación prioritaria’.

La Directiva, además de requerir su identificación, establece en su artículo 54, apartado 2, que en estas zonas deben llevarse a cabo mediciones de radón en todos los lugares de trabajo situados en plantas bajas o sótanos. La Instrucción IS-33 del CSN, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural, introducía ya un requisito análogo a este, dirigido a los “lugares de trabajo, subterráneos o no subterráneos, en áreas identificadas por sus valores elevados de radón” (ver IS-33, Anexo, punto 4). Sin embargo, la identificación de estas zonas con carácter normativo quedó pendiente.

En esta identificación ha venido trabajando la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental en los últimos

años, utilizando tanto las medidas de radón en viviendas de las que dispone el CSN como otra información ambiental.

La primera aproximación al problema, consistió en explotar la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre, que está relacionada con los niveles de radón. Así, el mapa MARNA (mapa de radiación gamma natural) [16] sirvió de base para elaborar el primer mapa predictivo de exposición al radón en España [17].

Posteriormente, este mapa predictivo se mejoró de acuerdo con una metodología híbrida desarrollada por el CSN [18]. De acuerdo con esta, se incorporaron al mapa las medidas de radón en viviendas, así como información geológica tomada del Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidades de España [19]. En concreto, el mapa integra las más de 12.000 medidas de radón en viviendas de las que dispone el CSN en la actualidad (una vez filtradas por criterios de calidad).

De esta forma, se elaboró el mapa de potencial de radón. Este potencial se define como el nivel de radón que supera (en planta baja o primera) el 10% de los edificios con concentraciones más elevadas de una determinada zona geográfica. El mapa se ha publicado en forma de tríptico en 2017 (ver figura 2) y está disponible en versión interactiva en la página web del CSN.

En vista de las concentraciones de radón existentes en nuestro país, reflejadas en el mapa, y puesto que la Directiva 2013/59 exige establecer un nivel de referencia no superior a 300 q/m^3 –igual al nivel que recomienda la Guía 11.2 del CSN– deberían priorizarse las actuaciones de protección en aquellas zonas en las que el potencial de radón supere dicho valor. Estas se corresponden con las zonas representadas en naranja y rosa en el mapa de la figura 2.

A nivel europeo, el CSN contribuye, además, al proyecto del “Atlas de Radiación Natural de Europa”, coordinado por el *Joint Research Centre* (JRC), y en



Figura 3. Cámara de radón INTE-UPC.

particular, al mapa europeo de radón en viviendas [20].

Calidad metrológica

Otra pieza importante del Plan es garantizar la fiabilidad de las mediciones que tanto en el ámbito de cumplimiento obligatorio como en el voluntario se hagan en las viviendas y lugares de trabajo.

En aras de esta fiabilidad, el CSN publicó ya en 2010 la Guía de Seguridad 11.1 [21]. En ella se establecen los requisitos fundamentales que deben cumplir los laboratorios y servicios de medida de

radón en el aire. Estos incluyen requisitos generales relativos a la gestión, basados en la norma ISO/IEC 17025, y requisitos técnicos específicos a la medida de radón. La Guía 11.1 se completó con otra específica sobre la metodología a seguir en los estudios de exposición al radón en los lugares de trabajo: la Guía 11.4 [22].

En la nueva legislación está previsto instaurar mecanismos de control tanto sobre estas entidades como sobre las que llevan a cabo los estudios que requiere en título VII del RPSRI, a fin de garantizar el cumplimiento de las recomendaciones dadas en las Guías.

Más allá del ámbito normativo, el CSN también ha desempeñado un papel relevante en apoyo de la calidad metrológica. Así, ha promovido diversos proyectos de investigación en la materia y apoyado la puesta en marcha de una cámara de radón en la Universidad Politécnica de Cataluña (que permite calibrar equipos de medida y hacer estudios de su respuesta). En 2004 financió la primera campaña de intercomparación de detectores de radón en nuestro país; y en 2011, la primera

El CSN, en 2004, financió la primera campaña de intercomparación de detectores de radón en nuestro país; y en 2011, la primera campaña de intercomparación de detectores de radón en condiciones de campo



Figura 4. Ejemplo de aplicación de una barrera anti-radón.

campana de intercomparación en condiciones de campo, organizada en las instalaciones de ENUSA de Saelices El Chico.

Edificaciones y radón

Desde hace décadas, países como el Reino Unido, EE.UU., o los países nórdicos requieren (vía las normas que regulan la edificación) soluciones específicas para impedir o mitigar la entrada de radón en los edificios que se construyan en determinadas zonas. Esta medida, de hecho, ha demostrado ser uno de los instrumentos más efectivos, a largo plazo, para reducir las exposiciones al radón de la población.

En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) regula los aspectos fundamentales de seguridad y habitabilidad de los edificios, entendida esta última como el conjunto de cualidades de un edificio que permiten su uso con un riesgo mínimo aceptable de deterioro de la salud. Concretamente, los requisitos relativos a la salubridad se desarrollan en el Documento Básico HS (DB-HS), que está previsto ampliar para incluir

una nueva sección dedicada específicamente a la protección contra el radón.

En este proyecto vienen trabajando el Ministerio de Fomento (con el apoyo técnico del Instituto Eduardo Torroja) y el CSN desde hace años. Los antecedentes de esta colaboración se remontan a 2002, cuando el CSN transmitió al Ministerio de Fomento la importancia de incluir en el CTE (entonces, en elaboración) requisitos específicos destinados a limitar la entrada de radón en los edificios.

La Directiva 2013/59/Euratom ha supuesto el impulso definitivo para culminar el proyecto, que lleva detrás importantes esfuerzos técnicos y de investigación con el fin de trasladar a nuestro país, de la forma más eficiente, la experiencia internacional en este ámbito.

En la nueva sección DB-HS se fijará la exigencia reglamentaria de que la concentración de radón en los recintos habitables no supere los 300 Bq/m³, que establece el artículo 74 de la Directiva 2013/59/Euratom.

Las soluciones constructivas que permiten cumplir esa exigencia pueden apli-

carse a edificios existentes, en los que habrá que intervenir para la introducción de las mismas, o a edificios de nueva planta, en los que podrán ser planteadas en fase de proyecto, por tanto, con mayor efectividad y garantías de éxito.

En general, e independientemente de si se trata de un edificio de nueva planta o un edificio ya construido, las técnicas de actuación se basan en dos estrategias, o en una combinación de éstas:

- Barreras para atenuar el paso del radón, consistentes en una membrana de material impermeable frente al paso de los gases entre el terreno y los elementos constructivos que están en contacto con el edificio (soleras, muros de sótano, forjados sanitarios, etc.)
- Sistemas de extracción (de tiro natural o forzado), que favorecen o fuerzan que el radón acumulado en las soleras, los forjados sanitarios, o en otros elementos contruidos *ad-hoc* bajo el edificio, salga al exterior en lugar de migrar al interior del edificio.

El borrador del documento básico sobre protección frente al radón está prácticamente finalizado y se tramitará a lo largo de 2017.

Conclusiones

La Directiva 2013/59/Euratom exige a los Estados miembros que pongan en marcha planes nacionales de actuación contra el gas antes de 2018. Aunque en España aún no se ha puesto en marcha un Plan de estas características se han completado ya, o están en fase de desarrollo avanzado, varios de elementos imprescindibles para ello. Esto, sumado a un importante capital humano y a la existencia de instrumentos ya maduros en otros campos afines, como la prevención de riesgos laborales o la salud ambiental, constituyen una base de éxito que el Plan Nacional debe ser capaz de explotar y promocionar. 

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DARBY S., HILL D., AUVINEN A., BARROS-DIOS J.M., BAYSSON H., BOCHICCHIO F., DEO H., FALK R., FORASTIERE F., HAKAMA M., HEID I., KREIENBROCK L., KREUZER M., LAGARDE F., MÄKELÄINEN I., MUIRHEAD C., OBERAIGNER W., PERSHAGEN G., RUANO-RAVINA A., RUOSTEENOJA E., SCHAF-FRATH ROSARIO A., TIRMARCHE M., TOMÁBEK L., WHITLEY E., WICHMANN H.E., DOLL R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control. *BMJ* 2005; 330:223. DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63.
- [2] RADPAR: Radon Prevention and Remediation Project. Executive Agency for Health and Consumers (EAHC) of DG SANCO. [Disponible en: <http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/index.cfm>]
- [3] HURTING F.H., HESSE W. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. *Vierteljahrsschr Gerichtl Med Offentl Gesundheitswesen* 1879; 30:296-307,31:102-132, 31:313-337.
- [4] ARNSTEIN A. Über den sogenannten "Schneeberger Lungenkrebs." *Verh dt Gesellsch Pathol*, 1913; 16:332-342.
- [5] BEIR IV. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1026>.
- [6] DARBY S., HILL D., DEO H., AUVINEN A., BARROS-DIOS J.M., BAYSSON H., BOCHICCHIO F., FALK R., FARCHI S., FIGUEIRAS A., HAKAMA M., HEID I., HUNTER N., KREIENBROCK L., KREUZER M., LAGARDE F., MÄKELÄINEN I., MUIRHEAD C., OBERAIGNER W., PERSHAGEN G., RUOSTEENOJA E., ROSARIO A.S., TIRMARCHE M., TOMÁSEK L., WHITLEY E., WICHMANN H.E., DOLL R. Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*. 2006; 32 Suppl 1:1-83.
- [7] KREWSKI D., LUBIN J.H., ZIELINSKI J.M., ALAVANJA M., CATALAN V.S., FIELD R.W., KLOTZ J.B., LÉTOURNEAU E.G., LYNCH C.F., LYON J.L., SANDLER D.P., SCHOENBERG J.B., STECK D.J., STOLWIJK J.A., WEINBERG C., WILCOX H.B. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology* 2005; 16: 137-145. DOI: 10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3.
- [8] KREWSKI D., LUBIN J.H., ZIELINSKI J.M., ALAVANJA M., CATALAN V.S., FIELD R.W., KLOTZ J.B., LÉTOURNEAU E.G., LYNCH C.F., LYON J.L., SANDLER D.P., SCHOENBERG J.B., STECK D.J., STOLWIJK J.A., WEINBERG C., WILCOX H.B. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J Toxicol Environ Health A*. 2006 Apr; 69(7):533-97. DOI: 10.1080/15287390500260945.
- [9] LUBIN J.H., WANG Z.Y., BOICE J.D. JR, XU Z.Y., BLOT W.J., DE WANG L., KLEINERMAN R.A. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer*. 2004 Mar; 109(1):132-7. DOI: 10.1002/ijc.11683.
- [10] ICRP Statement on Radon. Approved by the Commission in November 2009 (ICRP Ref. 00/902/09).
- [11] ICRP Publication 65. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. *ICRP Ann. ICRP* 23 (2), 1993.
- [12] Recomendación de la Comisión 90/143/EURATOM, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. [Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31990H0143:ES:PDF>]
- [13] Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural. BOE nº 22 de 26 de enero de 2012. [Disponible en: <https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/normativa/is-33.pdf>]
- [14] HERCA Common understanding and recommendations related of the BSS requirements on radon in workplaces [Disponible en: <http://www.herca.org/docstats/Common%20Understanding%20Radon.pdf>]
- [15] Radón. Un gas radiactivo de origen natural en su casa. CSN-UCAN. 1995.
- [16] Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Colección de Informes Técnicos, 5.2000. Referencia: INT-04-02. [Disponible en: <https://www.csn.es/documentos/10182/27786/INT-04-02+Proyecto+Marna.+Mapa+de+radiaci%C3%B3n+gamma+natural>]
- [17] El mapa predictivo de exposición al radón en España. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Colección de Informes Técnicos, 38.2013. Referencia: INT-04.31. [Disponible en: https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/informes_tecnicos/mapa_radn.pdf].
- [18] GARCÍA-TALAVERA M., GARCÍA-PÉREZ A., REY C., RAMOS L. Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information. *J. Radiol. Prot.* 33 (2013) 605-620. DOI:10.1088/0952-4746/33/3/605.
- [19] Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200.000. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2009. [Disponible en: http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/tematicos/pdfs/Mapa_Litoestratigrafico_200.pdf]
- [20] European Atlas of Natural Radiation. JRC. [Disponible en: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Consent/Atlas.aspx>]
- [21] Guía de Seguridad 11.2. Control de la exposición a fuentes naturales de radiación. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012 (24 págs.) Referencia: GSG-11.02. [Disponible en <http://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/CSN/GSG-11.02> Control de exposición fuentes naturales de radiacion.pdf]
- [22] Guía de Seguridad 11.1. Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2010 (32 págs.) Referencia: GSG-11.01.
- [23] Guía de Seguridad 11.4. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012 (32 págs.) Referencia: GSG-11.04.

El marco regulador español requiere a los titulares de centrales nucleares un programa de protección contra incendios ajustado a la Instrucción IS-30 del CSN

Modificaciones realizadas en las centrales nucleares españolas tras el accidente de Fukushima

Tras el accidente ocurrido el pasado 11 de marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Dai-ichi (Japón), los países de la Unión Europea sometieron a sus centrales a un conjunto de “pruebas de resistencia” para comprobar su capacidad de afrontar situaciones semejantes a las ocurridas en Japón. Como resultado de las pruebas, las centrales nucleares españolas identificaron diversos aspectos de mejora, que en su mayor parte ya han sido implantados.

Las actividades de mejora se han enfocado en la respuesta de las centrales ante sucesos naturales extremos, la respuesta de las plantas ante la indisponibilidad de sistemas como consecuencia de una pérdida de suministro eléctrico o sumidero final de calor, la mejora en la gestión de los accidentes severos y la mejora en la gestión de las emergencias.

■ Texto **Sara González Veci** | Técnico del Área de Ingeniería de Sistemas de la Subdirección de Ingeniería del CSN |
Fotografía **ANAV** | ■

A raíz del accidente que tuvo lugar el 11 de marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Dai-ichi en Japón, todos los países europeos iniciaron acciones encaminadas a verificar las medidas de seguridad implantadas en sus centrales. Sin embargo, en muy poco tiempo se hizo patente la conveniencia de desarrollar una respuesta coordinada dentro de la Unión Europea, con el fin de asegurar que todas las centrales nucleares de dichos países fuesen lo suficientemente robustas para soportar situaciones similares a las que se dieron en la citada central japonesa.

En mayo de 2011, el Consejo Europeo acordó un plan para someter a todas las centrales nucleares europeas a un conjunto homogéneo de “pruebas de resistencia”, que fueron definidas en un documento elaborado previamente por las siguientes organizaciones nucleares europeas: *Western European Nuclear Regulators Association* (WENRA) y *European Nuclear Safety Regulators Group* (ENSREG).

El objetivo de estas pruebas era realizar una evaluación de la capacidad de las centrales para soportar situaciones más allá de sus respectivas bases de diseño e identificar los márgenes de seguridad que existían respecto de estas bases, así como las potenciales medidas que se pudieran adoptar para mejorar su seguridad. Según lo acordado, esta evaluación se completó en todos los países antes del 31 de diciembre de 2011.

Como continuación de esta tarea, la Unión Europea inició un proceso para realizar un seguimiento de los planes de implantación de las nuevas medidas, que se ha desarrollado a lo largo del tiempo, y que ha supuesto la realización de tres seminarios en Luxemburgo (marzo de 2012) y Bruselas (abril de 2013 y abril de 2015), en los que se han comentado y discutido los resultados de las pruebas de resistencia y el proceso de implantación de las mejoras identificadas en cada país.

Como parte de este proceso de seguimiento, España recibió, en marzo de

2012, la visita de un equipo de expertos. Este equipo visitó algunas centrales nucleares europeas, de entre las que se encontraba la central nuclear de Trillo. Esta visita tuvo lugar en septiembre de 2012.

Un aspecto adicional, pero relevante, de las acciones post-Fukushima en Europa, es que los organismos reguladores miembros de WENRA han acordado ampliar el alcance del proceso de armonización de la normativa europea de seguridad nuclear para incluir nuevos Niveles de Referencia¹ derivados de las lecciones aprendidas de las pruebas de resistencia. Este proceso ha finalizado el 24 de septiembre de 2014 con la aprobación por WENRA de nuevos Niveles de Referencia que están siendo actualmente implantados por los países miembros en sus respectivas normativas nacionales.

Pruebas de resistencia en España

A nivel nacional, el 15 de marzo de 2012 el CSN emitió a cada titular de central nuclear una Instrucción Técnica Com-

plementaria (ITC), en la que se requería la implantación de las medidas de mejora identificadas por los titulares durante las pruebas de resistencia, así como algunas adicionales identificadas por este organismo.

En paralelo, el CSN emitió otra ITC en la que se abordaban aspectos complementarios relacionados específicamente con la posibilidad de mitigación de actos malevolentes que pudieran suponer la pérdida de Grandes Áreas de una central nuclear.

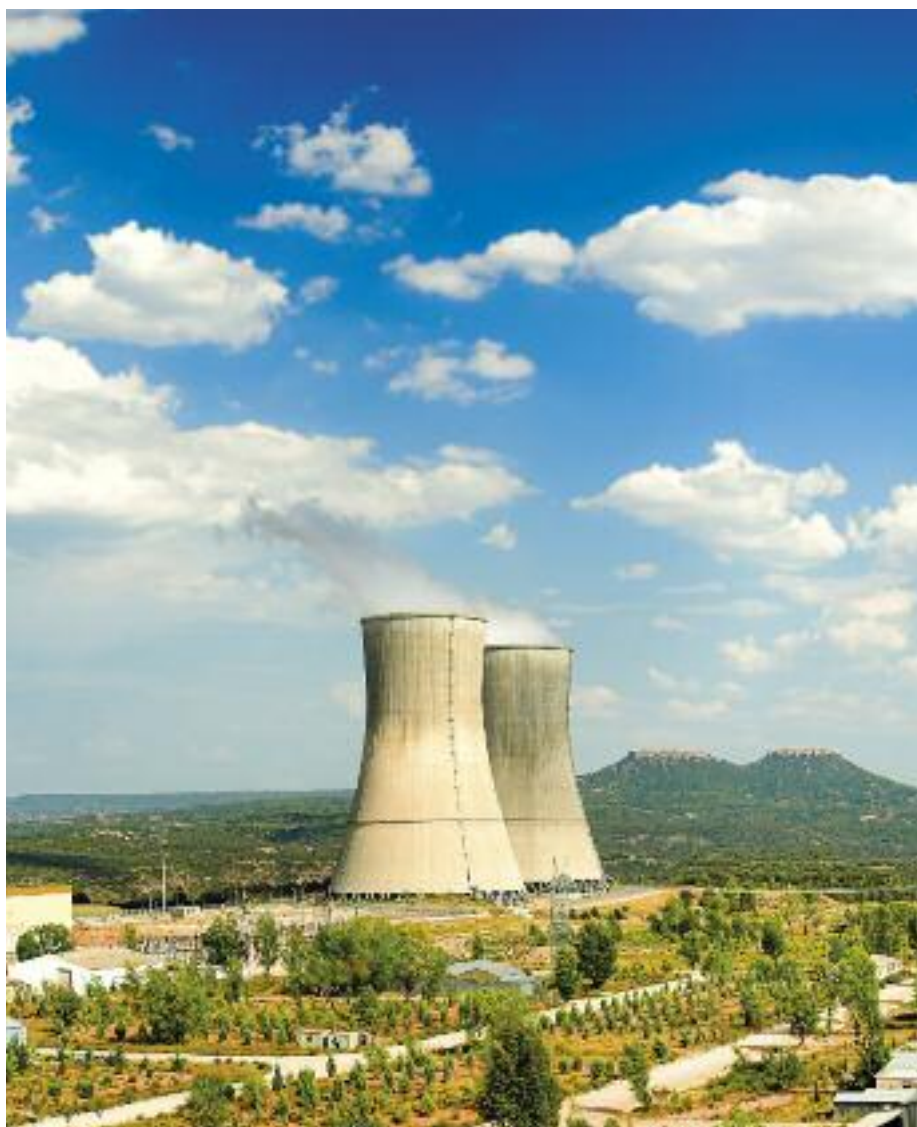
Las instrucciones técnicas complementarias emitidas por el CSN consideraban un calendario para su implantación dividido en tres periodos: corto, medio y largo plazo, cuyas fechas de finalización correspondían, respectivamente, con los años 2012, 2014 y 2016.

Cabe señalar que, desde el punto de vista regulador, las acciones adoptadas por los titulares en respuesta a las ITC emitidas por el CSN han entrado a formar parte de las Bases de Licencia de las centrales españolas, al igual que los procesos de mantenimiento y control asociados a las mismas.

Las mejoras más relevantes

El plan de acción nacional que ha sido llevado a cabo por el CSN y por las centrales nucleares españolas para dar respuesta a los requisitos de las ITC post-Fukushima se ha dividido en los siguientes bloques principales:

- Acciones relativas a la protección de las centrales nucleares frente a sucesos externos extremos.
- Acciones relativas a reforzar la seguridad de las centrales nucleares frente a la pérdida del suministro eléctrico y/o el sumidero final de calor.
- Acciones relativas a reforzar la capacidad de prevenir y mitigar accidentes severos.
- Acciones relativas a la gestión de las emergencias, incluidas aquellas origina-



Las actividades de mejora se han enfocado en la respuesta de las centrales ante sucesos naturales extremos o las consecuencias de una pérdida de suministro eléctrico, entre otras.

das por los sucesos externos indicados.

Las principales y más relevantes mejoras implantadas durante el desarrollo de las actividades anteriores se resumen a continuación.

1. Acciones relativas a la protección de las centrales nucleares frente a sucesos externos extremos

Dadas las características geográficas y ambientales de España, las actividades para mejorar la protección frente a sucesos externos extremos en las centrales nucleares españolas han ido enfocadas fundamentalmente al control tanto de

sismos como de inundaciones. A continuación se resumen las acciones principales que se han llevado a cabo:

a) Acciones para aumentar la resistencia sísmica de estructuras, sistemas y componentes (ESC).

Antes del accidente de Fukushima las centrales nucleares españolas ya contaban con análisis orientados a identificar vulnerabilidades de las plantas frente a sucesos más allá de las bases de diseño.

Los análisis anteriores consistían en valorar la capacidad de ESC para hacer frente a un sismo más allá del

establecido en la base de diseño de las plantas. Este sismo es el denominado Terremoto Base de Comparación (RLE, por sus siglas en inglés) y para las centrales españolas corresponde a una aceleración horizontal del terreno de 0,3g.

El valor de 0,3g se seleccionó en un proceso anterior por ser considerado como un margen adecuado de revisión para todas las plantas independientemente de su base de diseño sísmica.

Antes del accidente de Fukushima el cumplimiento de ESC con el margen sísmico anterior no era de obligado cumplimiento. Como consecuencia de las pruebas de resistencia, el CSN requirió a las centrales que garantizaran que las ESC relacionados con determinadas funciones de seguridad son capaces de soportar este valor de aceleración del terreno.

Las ESC analizadas han sido aquellas relacionadas con la pérdida de suministro eléctrico exterior y pequeño LOCA (ambos inducidos por un sismo), la integridad de la barrera de contención, la mitigación de situaciones de pérdida de suministro eléctrico

(SBO), la gestión de accidentes severos, así como la integridad y refrigeración de la piscina de combustible gastado.

Aquellas ESC que dieron como resultado una capacidad de resistencia sísmica inferior a 0,3g, han sido reforzadas estructuralmente.

b) Actualización de la caracterización sísmica de los emplazamientos en las centrales nucleares.

Si bien el valor de 0,3g de aceleración horizontal del terreno se ha utilizado como margen sísmico para garantizar que las ESC son capaces de soportar un sismo más allá de la base de diseño, se ha considerado conveniente actualizar la caracterización sísmica de los emplazamientos con objeto de contar con información actualizada de las características reales de los emplazamientos.

De este modo, como continuación del proceso de las pruebas de resistencia, el CSN ha emitido en 2015 una nueva ITC en la que requiere a los titulares que actualicen la caracterización sísmica de los emplazamientos de las centrales nucleares, de acuerdo con las metodologías más avanzadas

que actualmente se conocen (OIEA, NRC...). El proceso está previsto que finalice en 2019.

c) Acciones para mejorar la respuesta de la planta frente a inundaciones internas.

Las centrales nucleares españolas han realizado análisis de las inundaciones internas que se generarían tanto por la rotura de tuberías que no sean de Categoría Sísmica I, como por la rotura de cualquier estructura, sea de la categoría sísmica que sea, que conlleven grandes liberaciones de fluido.

El objetivo de los análisis anteriores era verificar tanto que la capacidad de detección de inundaciones en las plantas como que las barreras existentes son adecuadas para estos escenarios.

Como consecuencia de los resultados de los análisis anteriores, se han llevado a cabo diversas mejoras en las plantas. Algunos ejemplos de estas modificaciones corresponden a la revisión de procedimientos para realizar aislamientos en caso de sismo, instalación de puertas estancas, incorporación de nueva instrumentación de clase 1E para detección de inundación, modificaciones de diseño para dotar a las tuberías que así lo requieran de margen sísmico, el refuerzo de tanques, etc.

d) Análisis de los escenarios de rotura de presas.

Los titulares de las plantas españolas han realizado análisis de los escenarios de rotura de presas incluidos en las pruebas de resistencia frente a los contenidos en los planes de emergencia de dichas presas. Los análisis anteriores han determinado que o bien las presas situadas aguas arriba de los emplazamientos cuentan con una resistencia sísmica aceptable (igual o por encima de 0,3g de aceleración horizontal pico) o bien, en caso de inundación derivada de una potencial rotura encadenada, la cota de explanación de la central esta-



Sismos e inundaciones son los objetos fundamentales de las nuevas medidas de control.

ría por encima de la cota máxima de inundación obtenida de los análisis de inundaciones por rotura de presas, resultando aceptable la situación de la central.

e) Acciones para mejorar la respuesta de la planta frente a inundaciones externas.

Los titulares han implantado diversas mejoras entre las que cabe destacar las modificaciones de diseño para incrementar la capacidad de drenaje de las plantas en caso de lluvias extremas.

En el caso concreto de CN Ascó y CN Vandellós II, adicionalmente han reforzado el encauzamiento de los barrancos cercanos. Cabe destacar, por la envergadura de los trabajos, el refuerzo del muro que canaliza el barranco de Malaset, cercano a CN Vandellós II, para evitar la entrada de agua en el emplazamiento. En el caso de las centrales de Almaraz, Cofrentes y Trillo, se han implantado diversas mejoras para incrementar la capacidad de drenaje de las redes de aguas pluviales en cada emplazamiento, incluyendo una mayor capacidad para evacuar aguas pluviales en arquetas y galerías enterradas.

f) Elaboración de nuevos protocolos para casos de carencia de datos meteorológicos en el emplazamiento

El CSN ha promovido la implantación de un sistema de preaviso a las centrales para condiciones meteorológicas extremas así como el desarrollo de procedimientos adecuados a seguir por los operadores en caso de producirse esta situación.

Mediante estos nuevos protocolos, en caso de carencia de datos meteorológicos en el emplazamiento, estos podrían ser suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Asimismo los titulares pueden solicitar a AEMET previsiones meteorológicas en caso de condiciones adversas.



Las mejoras en las plantas son el resultado de los análisis de las Pruebas de Resistencia.

2. Acciones relativas a reforzar la seguridad de las centrales nucleares frente a la pérdida del suministro eléctrico y/o el sumidero final de calor.

Los titulares han implantado protocolos que tratan de garantizar el restablecimiento rápido del suministro eléctrico exterior, desde unidades hidráulicas cercanas al emplazamiento.

Se han realizado también acciones para mejorar, en situaciones extremas, la fiabilidad del suministro de corriente continua, tales como el desarrollo de procedimientos para la desconexión de cargas que no sean esenciales con el fin de alargar la autonomía de las baterías, mejoras en la capacidad para recargar las baterías desde generadores móviles o disponer de baterías portátiles para casos específicos de pequeñas cargas, tales como instrumentación crítica.

Para hacer frente al SBO prolongado, y también a la pérdida del sumidero final de calor, se han implantado nuevas estrategias, basadas tanto en equipos y conexiones fijas como en equipos portátiles. Entre estos últimos cabe destacar los generadores diésel, los equipos de bombeo

y los sistemas de comunicación y alumbrado.

Estos equipos están diseñados para mantener su capacidad en las condiciones previstas en las pruebas de resistencia, están sometidos a un programa específico de vigilancia y prueba periódica y su uso se realizaría bajo la filosofía general de “enchufar y usar” (*plug&play*). Para esto, se han instalado conexiones fijas (mecánicas y eléctricas) para facilitar el uso de las bombas y generadores portátiles.

Adicionalmente, los titulares han llevado a cabo pruebas reales de actuación manual local de algunos sistemas para comprobar su fiabilidad en caso de pérdida de sus sistemas soporte y de la actuación remota. Así, las centrales PWR han hecho pruebas de operación de la turbobomba del sistema de Agua de Alimentación Auxiliar y CN Cofrentes ha hecho pruebas de la turbobomba del sistema de Refrigeración del Núcleo Aislado (RCIC).

3. Acciones relativas a reforzar la capacidad de prevenir y mitigar accidentes severos, incluidos aquellos originados por los sucesos externos indicados.

Para la mejora de la gestión de los accidentes severos se han llevado a cabo diversas mejoras de entre las que cabe destacar el desarrollo de nuevas estrategias para la inyección alternativa desde los nuevos equipos portátiles al circuito primario, a la contención y a la piscina de combustible gastado.

Otro aspecto relevante es que se ha dotado a las centrales de suficientes consumibles para garantizar la autonomía del emplazamiento durante al menos tres días. Esta autonomía llegaría hasta una semana con suministros desde el ex-

De entre las modificaciones llevadas a cabo en las centrales para mejorar la gestión de los accidentes severos, cabe destacar las dos siguientes por su especial relevancia:

–En cada unidad se ha implantado un sistema de venteo filtrado de la contención (SVFC).

En el hipotético caso de un accidente severo que conllevara un aumento de presión tal que la integridad de la contención se viera amenazada, sería necesario realizar un venteo de la misma. El nuevo sistema tiene por objeto permitir

ha emitido nueva normativa relacionada con los accidentes severos. En concreto se ha emitido la Instrucción del CSN (IS-36) sobre Procedimientos de Operación de Emergencia y Gestión de Accidentes Severos que incorpora aspectos novedosos relacionados con Procedimientos y Guías para situaciones de emergencia, incluyendo las que hayan ocurrido durante parada y las que afectan a la piscina de combustible gastado.

Las piscinas de combustible gastado, junto con sus sistemas asociados, dotan de blindaje neutrónico y de refrigeración a los elementos de combustible gastado que se encuentran alojados en ellas.

Para mantener estas funciones se han llevado a cabo una serie de mejoras tales como la mejora de la instrumentación de nivel y temperatura, modificaciones para dotar de capacidad de aporte a la piscina y de rociado del combustible sin necesidad de acceder al edificio de combustible, e implantar medidas apropiadas para evitar drenajes inadvertidos de la piscina.

De entre las mejoras relacionadas con la protección radiológica cabe destacar el desarrollo por parte de los titulares de guías complementarias a las de gestión de los accidentes severos con información práctica para la estrategia específica: caminos y ubicación de equipos, condiciones radiológicas y dosis estimadas e instrucciones específicas y medios de protección para los operadores que implantan la estrategia. Incluyen una clasificación radiológica de zonas, de tipo cualitativa y establecida en cuatro zonas.

Estas fichas de Protección Radiológica también se han elaborado para las estrategias de la piscina de combustible gastado. Para su elaboración se ha tenido en cuenta la potencial pérdida de inventario de agua en la piscina, de manera que establece las maniobras que es posible realizar dependiendo del tiempo que haya transcurrido desde el inicio del accidente en piscina.



Estos equipos están sometidos a un programa específico de vigilancia y prueba periódica.

terior mediante de equipos ligeros.

Como consecuencia de las pruebas de resistencia se identificó la necesidad de contar con guías para un eventual accidente severo que se inicie estando la central en situación de parada. Estas guías ya han sido elaboradas por los titulares.

Durante un accidente severo, es de especial relevancia contar con suficientes medios humanos. En este sentido se ha mejorado la dotación de la Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) de cada central.

este venteo minimizando las emisiones radiactivas al exterior.

–Se han implantado en todas las contenciones un sistema de Recombinadores Pasivos Auto-catalíticos (PAR), excepto en el caso de CN Trillo que ya contaba con este sistema. Se trata de un conjunto de equipos completamente pasivos que son capaces de reducir la concentración de gases combustibles en la contención, minimizando el riesgo asociado a los mismos.

Cabe destacar asimismo que el CSN

4. Acciones relativas a la gestión de las emergencias, incluidas aquellas originadas por los sucesos externos indicados

Uno de los aspectos más relevantes en lo que respecta a las medidas implantadas para mejorar la gestión de la emergencia ha sido la instalación, en cada emplazamiento, de un Centro Alternativo de Gestión de Emergencias (CAGE).

Se trata de un centro concebido para gestionar un accidente bajo condiciones muy severas, que ha sido diseñado con unos criterios estrictos en lo que respecta a sismo (es capaz de soportar una aceleración horizontal del terreno de 0,5g), inundaciones y radiación.

Con objeto de que sirva como apoyo a la emergencia de cualquier central, los titulares han constituido un CAE o Centro de Apoyo de Emergencias, ubicado en las cercanías de Madrid, con capacidad de envío a cualquier emplazamiento, en menos de 24 horas, de personal entrenado y equipos (bombas y generadores diésel) para apoyo a la emergencia.

Además de lo anterior, siempre y cuando la emergencia a nivel nacional lo permita, la Unidad Militar de Emergencias (UME) estaría disponible para asistir a la central accidentada si fuera necesario.

Otra de las mejoras asociadas a la gestión de accidentes ha sido la elaboración por parte de los titulares de estudios de capacidad de acceso alternativo al emplazamiento en caso de situaciones ambientales extremas. Estos estudios han conllevado el desarrollo de mejoras.

Se han mejorado asimismo las capacidades de las plantas con más de una unidad (CN Ascó y CN Almaraz) para gestionar el accidente en caso de que se produjera en las dos unidades simultáneamente. Ejemplos de mejoras relacionadas con este aspecto son el incremento

de la dotación humana tanto del retén como del turno de operación, dimensionamiento adecuado del CAGE o la elaboración de simulacros que contemplen accidentes simultáneos.

Se han mejorado también los medios necesarios para estimar y reducir emisiones radiactivas. De entre las medidas adoptadas cabe destacar la disponibilidad en SBO del sistema de toma de muestras, el funcionamiento de los monitores de radiación en accidente severo, la implantación en cada emplazamiento de una red *online* de alerta de radiactividad ambiental con recepción de datos en sala de control y en el CAT (y su reenvío a la sala de Emergencias

Es necesario que las centrales mantengan a lo largo del tiempo la alta fiabilidad de las nuevas estrategias y de los equipos. Para garantizarlo, cuentan con programas de vigilancia periódica

del CSN), la elaboración de estrategias para el rociado externo de las fugas de contención u otros edificios que pudieran tener fugas radiactivas con el objetivo de reducir la cantidad emitida de productos de fisión mediante la utilización de cañones monitores portátiles y la mejora de la gestión de los líquidos generados durante la mitigación de un accidente más allá de la base de diseño (mejora de la red de pluviales, incorporando equipos destinados a su aislamiento).

Durante una emergencia son de especial relevancia las comunicaciones. En este sentido se han mejorado las comunicaciones bajo estas circunstancias mediante el uso de tecnología satelital y alimentación con grupos diésel los medios de comunicación que permiten establecer contacto entre el grupo de gestión de la emergencia con los grupos de actuación en el proceso de mitigación de ésta y con las autoridades competentes en el exterior.

Situación actual y expectativas

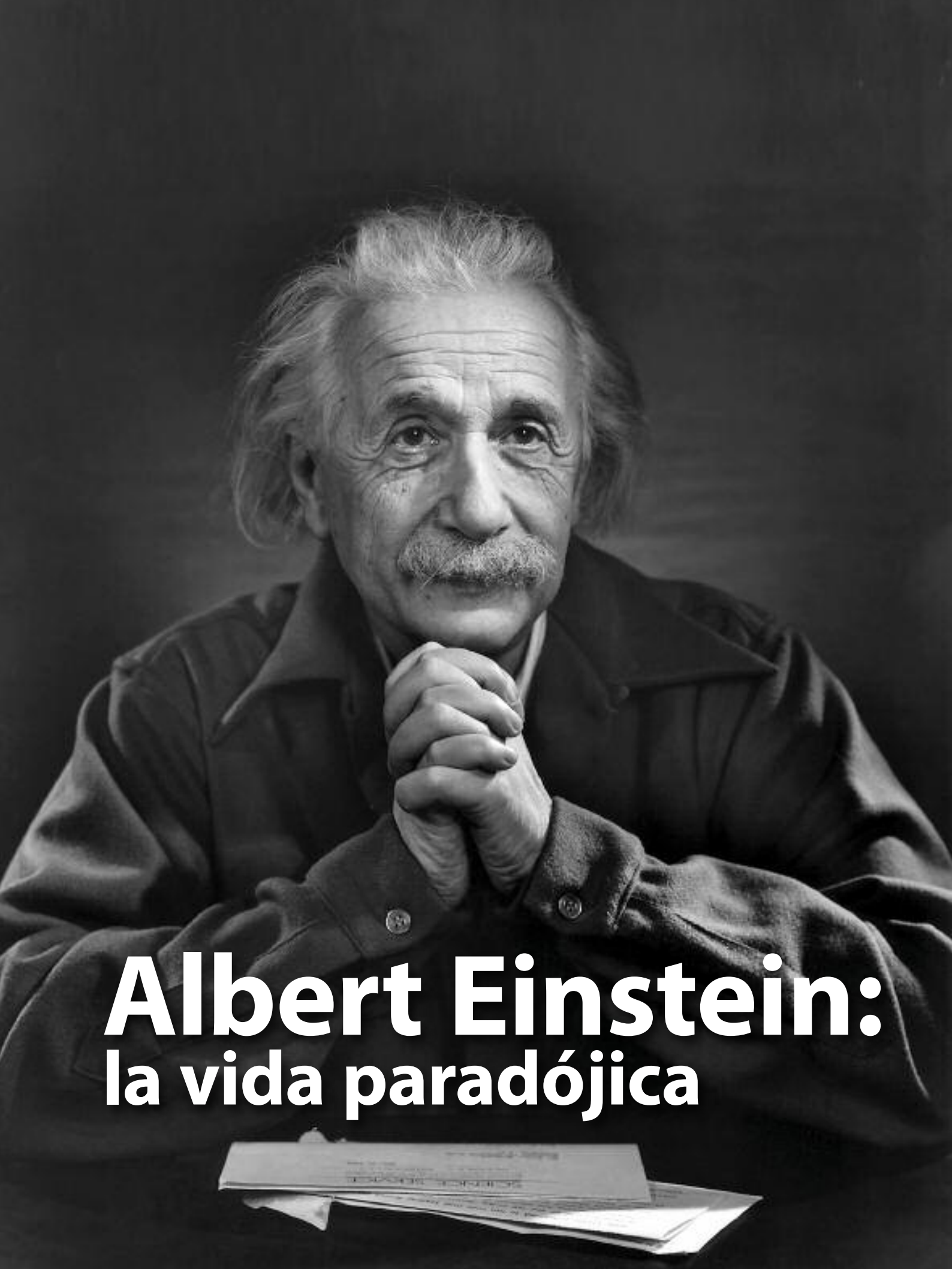
En el momento actual, las centrales nucleares españolas han implantado ya la mayor parte de las acciones que estaban previstas. Sin embargo, algunas de estas acciones han sido diferidas por diversos motivos.

Estas últimas se encuentran en un estado muy avanzado y se conoce en detalle las características de la medida a implantar y su fecha de puesta en servicio. Se considera, por tanto, que el proceso de mejora de la seguridad abordado en España tras el accidente de Fukushima se va a completar de acuerdo con las expectativas iniciales.

Además de las mejoras implantadas, es necesario que las centrales mantengan a lo largo del tiempo la alta fiabilidad de las nuevas estrategias y de los equipos. Para garantizar esto las centrales cuentan con programas de vigilancia periódica.

Por otra parte, los procesos de mejora en las centrales nucleares españolas no concluyen necesariamente con las Pruebas de Resistencia sino que, como parte de los procesos de Revisión Periódica de la Seguridad, podrían llegar a originarse nuevas mejoras que contribuyan a la mejora continua de la seguridad de nuestras instalaciones. 

¹ Los Niveles de Referencia constituyen unas pautas generales acerca de la normativa que los países miembros de WENRA deben adoptar en lo que respecta a la seguridad nuclear.



Albert Einstein: la vida paradójica

El suyo sigue siendo uno de los apellidos más reconocibles en todo el mundo, sinónimo de genio desde hace generaciones. La gran paradoja de Einstein es que ganó celebridad mundial trabajando en un campo cuya explicación era difícil para

la inmensa mayoría que le reverenciaba. Tras el tópico de científico distraído se escondía una personalidad compleja y una vida donde los puntos oscuros se mezclaron con los periodos de luz.

■ Texto **Vicente Fernández de Bobadilla** | Periodista ■

El 18 de abril de 1955, cuando Albert Einstein llevaba muerto menos de 24 horas, el patólogo forense Thomas Harvey tomó la decisión de extraer el cerebro del cadáver. Mantenía la idea de que el examen de aquellos 1.230 gramos de material orgánico color gris rosado permitiría arrojar nueva luz sobre uno de los grandes misterios del ser humano, la naturaleza del genio. Quizá la corteza, quizá alguno de los lóbulos, podrían albergar alguna anomalía detectable que explicara el funcionamiento de aquella mente excepcional. No se sabe en qué momento Harvey tiró la toalla y abandonó tanto su proyecto como el cerebro que había mantenido en formol, y que no sería recuperado hasta 1978. El patólogo fue incapaz de encontrar en el órgano que había albergado aquellos inigualables procesos mentales nada que lo diferenciara del de cualquier otro ser humano.

La acción de Thomas Harvey ha sido disculpada por algunos, y explicada por otros como una tentación irresistible de ganar notoriedad: tenía, literalmente, en sus manos, el cerebro del mayor genio científico del siglo XX. Décadas después de su muerte, su sombra sigue siendo alargada: los premios Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica de este año irán a parar a los físicos Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish por haber demostrado en 2016 la existencia de las ondas gravitacionales -ondulaciones en el espacio tiempo que viajan a la velocidad de la luz y que son producidas por agujeros negros, estrellas de neutrones o supernovas-, noventa y nueve años después

de que Einstein planteara su existencia. Ningún otro investigador incorporó su imagen a los pósters con que los universitarios de los setenta decoraban sus dormitorios; ningún otro tiene un apellido que se haya convertido en sinónimo de inteligencia –a nadie se le dice “eres una Curie” o “eres un Hawking”–; Einstein fue el primer científico mediá-

*Noventa y nueve años
después de que Einstein
planteara su existencia,
las ondas gravitacionales
reciben el Premio Princesa
de Asturias de Investigación
Científica y Técnica
de 2017*

tico, algo a lo que sin duda contribuyó su imagen de marca, constituida por el torpe aliño indumentario de trajes desfondados, cabellera desgredada, unos ojos vivaces y bondadosos, y un bigote que los años fueron haciendo más espeso, como una pantalla de protección frente al mundo de alguien que se definió como “un auténtico solitario”.

Su fama mundial le garantizó un tratamiento de celebridad en cualquiera de los muchos países que visitó, España incluida. En sus últimos años no podía dar un paseo sin que le acosaran los fans, experiencia que para su legendaria

modestia resultaba una tortura, y de la que salía, según confesó, diciendo a aquellos admiradores “lo siento, pero me confunden muy a menudo con el profesor Einstein”. De ser preguntados, muchos de quienes se le acercaban no hubieran podido explicar el motivo de tanta reverencia, del mismo modo en que no habrían sido capaces de explicar en qué consistía su trabajo, ni siquiera en su vertiente más conocida, la Teoría de la Relatividad. No admiraban su labor, sino su figura. Pero no sabían por qué.

El estatus de Einstein como símbolo de la ciencia tiende a ocultar, al menos parcialmente, otros aspectos de su personalidad y su biografía que arrojan una buena cantidad de paradojas, comparables con las que se dedicó a descifrar a lo largo de su vida. Se le atribuyen muchas anécdotas apócrifas que abonan el tópico del científico despistado, cuando la verdad es que pocas cosas del mundo que le rodeaban escapaban a su atención: además de su producción científica, habló y escribió sobre el judaísmo y la fundación del Estado de Israel; sobre la necesidad de una sociedad de naciones que actuara como supervisor mundial para evitar nuevos conflictos bélicos; sobre pacifismo y sobre su aborrecimiento de los ejércitos; sobre religión y filosofía. Era, además, melómano y violinista consumado, con predilección por Mozart y Bach. Leía a Kant, Hume, Spinoza y Poincaré, y a los grandes de la literatura, y aún tenía tiempo para entregarse a una de sus diversiones favoritas, como navegar por los lagos en su pequeño barco de vela. Por encima



A la izquierda, Einstein junto a su primera esposa (1913), la también física Mileva Maric. Además de por la ciencia, Einstein sentía una gran pasión por la música. El reconocimiento mediático le llegó tras la I Guerra Mundial, una fama que disfrutaba y sabía utilizar. A la derecha, el físico junto a Charles Chaplin.

de todo, destacaba la amabilidad de su carácter, que conquistaba a todos. En su ámbito privado, las cosas con frecuencia adquirían otro cariz, en una vida más dominada a veces por las sombras que por esa luz que tanto le sirvió como campo de trabajo.

Pasión por la ciencia

Las leyendas sobre la vida de Einstein comienzan poco después de su nacimiento. Nacido en Ulm (Alemania, 1879), descendía por ambos lados de comerciantes y emigrantes judíos. Su padre, Hermann, había mostrado una gran inclinación por las matemáticas, pero no pudo ver cumplidos sus sueños de ingresar en la universidad, y tuvo que dedicarse al comercio. Fundó diversas empresas, muchas de las

cuales sufrieron fuertes reveses de los que le sacaría la fortuna de la familia de su esposa. Los vaivenes financieros de su padre fueron una constante fuente de preocupación para el joven Albert, que se veía dividido entre su pasión por la ciencia y la necesidad de buscar un empleo estable con el que contribuir a la economía familiar.

Se ha dicho –y es cierto– que tardó en aprender a hablar; sus dificultades para ello hizo que la criada de su familia le llamara “el atontado” y que algunos parientes le consideraran casi retrasado. También se ha dicho –y es falso– que fue un mal estudiante y que suspendió matemáticas en la escuela. La verdad es que sus notas fueron siempre altas, y que incluso en las materias que menos le gustaban –como el latín y el griego– se las

arreglaba para quedar entre los primeros de la clase, cuando no el primero. El problema era que no tenía ni aptitudes ni paciencia para el aprendizaje memorístico. Su fuerte era la creatividad, y la defendió afirmando que “la imaginación es más importante que el conocimiento”.

Quizá el mayor error de juicio sobre Einstein sea el que le muestra como un humilde empleado de la Oficina Nacional de Patentes de Berna que asombró al mundo científico publicando, a lo largo de 1905, cuatro artículos en la revista *Annalen der Physik* que cambiarían la historia de la física. Es cierto que desarrolló sus teorías prácticamente en solitario, pero para entonces el joven Einstein era mucho más que un simple oficinista: su paso por la Escuela Politécnica Nacional de Zurich –se

$$E=mc^2$$

HISTORIA DE LA FAMOSA ECUACIÓN

La ecuación $E=mc^2$ describe la relación entre la energía (E), la masa (m) y la velocidad de la luz (c). La ecuación implica que la energía liberada cuando una cierta cantidad de masa es desintegrada es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. Es decir, que una pequeña cantidad de materia puede convertirse en una enorme suma de energía.

1900	1902	1909	1915	1917	1921
Se gradúa como profesor de matemáticas y física.	Ingresó como funcionario en la Oficina Federal de Patentes de Berna	Inicia su trabajo como profesor en la Universidad de Zurich	Publica La Teoría General de la Relatividad	Plantea que el Universo está en expansión	Recibe el Premio Nobel de Física

España: el sabio, en el andén

Los primeros años de su fama llevaron a Einstein de una a otra parte del mundo, en una fiebre viajera de la que España formó parte. Su estancia tuvo lugar del 22 de febrero al 13 de marzo de 1923, y le llevó a Barcelona, Zaragoza y Madrid. Un tiempo en el que “don Alberto”, o “el sabio”, como le llamó la prensa de la época, fue la estrella absoluta no sólo del mundo científico, sino también social.

Einstein llegó a España como parte de un periplo internacional, en respuesta a una invitación del matemático Julio Rey Pastor y del físico Esteban Terradas. A su llegada olvidó comunicar a sus anfitriones en qué tren viajaba, por lo que no había nadie esperándole en Barcelona. Tranquilamente, se alojó con Elsa en un hotel, desde donde mandó una nota a Terradas. Cuando el director del establecimiento se enteró de la fama de su huésped, fue a verle a su habitación y le encontró tocando el violín.

Sus conferencias se ciñeron a la materia estrictamente científica, con su Teoría de la Relatividad en primer término. Al igual que había ocurrido en otras partes del mundo, los periodistas frivolizaron con el contenido de las mismas, o las calificaron directamente de incomprensibles. Hubo excepciones, como *El Debate*, que no dudó en recurrir al lenguaje científico para explicarlas.

La llegada de Einstein se produjo en lo más parecido que España ha tenido a una edad de

oro de la ciencia, con abundante correspondencia entre científicos españoles y extranjeros. Trece años después de su visita, las mismas fuerzas que le echaron de Europa enterrarían durante décadas la búsqueda del conocimiento en nuestro país.



nacionalizó suizo para acceder a ella— había dejado, para bien y para mal, una huella profunda. Su brillantez era tan indudable como su capacidad para irritar a los profesores que podían haberle ayudado a abrirse camino en el mundo académico. Además, se había enamorado de la única mujer presente en su clase, una joven húngara llamada Mileva Maric, con la que se casó en 1903 pese a la fuerte oposición de su familia. La necesidad acuciante de un

empleo fue lo que le llevó a la Oficina de Patentes; trabajo que encontraba divertido y que acostumbraba a liquidar en unas horas para dedicar el resto de la jornada a concentrarse en sus ecuaciones.

En cuanto a los artículos, el primero estaba dedicado al movimiento browniano, otro al efecto fotoeléctrico, y otro, según explicó a un amigo, “es todavía un tosco borrador de una electrodinámica de los cuerpos en movimiento, que emplea una

modificación de la teoría del tiempo y del espacio”. Acabó siendo mucho más que eso, como explicó su biógrafo Walter Isaacson: “Basándose en experimentos mentales —realizados en su cabeza y no en un laboratorio—, había decidido descartar la concepción newtoniana de un espacio y un tiempo absolutos, en lo que pasaría a conocerse como la ‘teoría de la relatividad especial’”. Como colofón, aquel mismo año redactó un apéndice de este último artículo que postulaba la relación entre energía y masa, cuya importancia capital quedaría grabada para siempre en la ecuación más famosa del mundo: $E=mc^2$.

El genio mediático

Con todo, el reconocimiento tardó en llegar. No fue hasta después de la Primera Guerra Mundial, cuando la sociedad de posguerra necesitaba de nuevos ídolos que maravillaran al público y le hicieran olvidar los horrores pasados. Joyce y Proust en la literatura, Picasso en la pintura, Chaplin en el cine, Einstein en la ciencia. Como escribió Bill Bryson, “con la pipa, la actitud cordial y modesta y el pelo electrificado, Einstein era un personaje demasiado espléndido para mantenerse permanentemente en la oscuridad”.

Comenzó a ganar presencia mediática en 1919, cuando la observación de un eclipse permitió confirmar sus cálculos sobre la curvatura de la luz (*The Times* tituló: “Las teorías de Newton, derrocadas”); dos años después, recibió el premio Nobel por sus descubrimientos sobre el efecto fotoeléctrico; pero fue su Teoría de la Relatividad lo que le convirtió en estrella. Era el tema de moda, sobre el que tenían que hablar, a favor o en contra, todos los grandes físicos de la época: además de su interés científico intrínseco, la curiosidad del público les impulsaba a ello. El libro *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* que el propio Einstein publicó en 1916 para dar a su pensamiento un

tono más divulgativo, fue un éxito de ventas internacional.

Para entonces, hacía tiempo que su matrimonio con Mileva había fracasado. En 1901 tuvieron una hija ilegítima –hecho que no se conoció hasta 1986, cuando se publicó la correspondencia entre ambos– cuyo destino ha sido siempre incierto; la teoría más aceptada es que fue dada en adopción y murió de escarlatina en 1903. Si bien tuvieron otros hijos –Hans Albert (1904) y Eduard (1910)–, aquella pérdida aumentó el carácter ya de por sí melancólico de Mileva, al tiempo que su interior cultivaba una creciente frustración por haber renunciado a su carrera científica en favor del trabajo de su marido, cuya fama no cesaba de crecer. Se divorciaron en 1919, y ese mismo año Einstein se casó con su prima Elsa, tres años mayor que él, divorciada y con dos hijas, con quien llevaba años manteniendo relaciones; con ella encontró una compañera que fue al mismo tiempo refugio de su trabajo académico y su creciente fama. Una fama que le producía sensaciones ambivalentes: si bien se quejaba de cómo interfería en la disciplina necesaria para su trabajo, tam-

Es cierto que tardó en aprender a hablar y que sus familiares le consideraban retrasado, pero falso que fuera un mal estudiante que suspendía matemáticas

bién la disfrutaba y utilizaba. Era un entrevistado brillante e ingenioso; podía sustituir un discurso por la interpretación al violín de Mozart, o aparecer junto a Charlie Chaplin en el estreno de *Luces de la Ciudad*. Cuando llegó por segunda vez a Estados Unidos, accedió a dar una rueda de prensa ante periodistas que “plantearon preguntas exquisitamente estúpidas, a las que yo respondí con chistes baratos que fueron acogidos con entusiasmo”.

Pero los chistes se fueron haciendo menos frecuentes a medida que en su país natal la amenaza de Hitler se volvía imposible de ignorar. En 1933 se instaló definitivamente en Estados Unidos –obtendría la

ciudadanía en 1940–, al tiempo que renunciaba a la ciudadanía alemana y dimittía de sus cargos en la Academia Prusiana de Ciencias; los nazis allanaron sus dos casas en Alemania e iniciaron una furiosa campaña contra él. Al mismo tiempo, en su nuevo país de adopción, el FBI de J. Edgar Hoover le investigaba por sus presuntas simpatías socialistas. Su defensa del pacifismo a ultranza tuvo finalmente que capitular: “Mientras Alemania persista en rearmar y adoctrinar sistemáticamente a sus ciudadanos para una guerra de venganza, las naciones de Europa Occidental dependen, por desgracia, de la defensa militar”, fue uno de los textos que escribió en la época para explicar lo que no era tanto un cambio de postura como una claudicación ante la realidad.

El Proyecto Manhattan

Pero quedaba la máxima claudicación, que al mismo tiempo daría lugar al máximo equívoco sobre su figura, cuando en 1939 los físicos Leo Szilárd y Eugene Wigner le visitaron para advertirle de la posibilidad de crear una reacción nuclear en cadena que daría lugar a bombas de una



Los científicos nucleares Szilárd y Teller solicitaron ayuda a Einstein para que advirtiera al presidente Roosevelt, a través de una carta, de que los alemanes estaban utilizando la fisión nuclear para la producción de bombas (1939). A raíz de ésta, se puso en marcha el Proyecto Manhattan, del que fue responsable Robert Oppenheimer (imagen a la izquierda).

potencia explosiva nunca antes vista; Szilárd le explicó el proceso por el cual la reacción podía producirse en una masa de uranio estratificado por medio de los neutrones liberados en la fusión nuclear. El resultado de aquel encuentro fue una carta preparada por los tres, pero firmada por Einstein, donde pedían al presidente Roosevelt que acelerara las investigaciones en este campo, ante la posibilidad de que los alemanes pudieran desarrollar su propia bomba atómica.

Esta carta ha sido el motivo de que se considere a Einstein uno de los padres de la bomba, cuando la verdad es que el proyecto Manhattan no se pondría en marcha hasta dos años después, y él no fue invitado a formar parte; ni era físico nuclear, ni el FBI lo habría permitido, dadas las sospechas que mantenía sobre su ideología. Su única participación en el proceso se dio cuando el supervisor Vannebar Bush le pidió ayuda para resolver un problema relacionado con la separación de isótopos que contenían rasgos químicos. Pero tras las bombas de Hiroshima y Nagasaki, la revista *Time* lo sacó en su portada con un retrato tras el que asomaba un hongo atómico que llevaba escrita la fórmula $E=mc^2$. Su ligazón en la cultura popular con el desarrollo de la bomba quedaba así fijada de manera indeleble.

En realidad, Einstein se mostró horrorizado cuando conoció la noticia de los bombardeos; nunca había creído que un arma semejante llegara a ser empleada por ningún país, ya que consideraba –acertadamente– que ello desataría una carrera internacional de armamentos nucleares. Tras la guerra, intensificaría su mensaje pacifista que, junto con la defensa del judaísmo y la persecución de la Teoría del Campo Unificado –que nunca completó– ocuparía gran parte de sus intervenciones.

En su vida cotidiana en la Universidad de Princeton, seguía cultivando su imagen de hombre afable que atendía con amabilidad a todos, comenzando por sus ayudan-



En su vida cotidiana en la Universidad de Princeton, seguía cultivando su imagen de hombre afable que atendía con amabilidad a todos. Arriba, una imagen con sus nietas.

tes. La parte oscura estaba por dentro, y abarcaba desde el distanciamiento con su hijo Hans a la reclusión de Eduard, afectado de esquizofrenia, en un sanatorio. La muerte de su madre y la de la propia Elsa, en 1936, le afectaron profundamente; fue la primera vez que algunos de sus conocidos le vieron llorar. Einstein no tenía problemas en el trato social con colaboradores, amigos o amantes, siempre y cuando no le supusiera un compromiso emocional. Su refugio frente a los reveses que se mostraban especialmente duros fue siempre sumergirse en el trabajo.

En esos años le fue detectado un aneurisma en la aorta abdominal, que con los años iría complicando progresivamente su salud. La hospitalización definitiva llegó en 1955. El domingo 17 de abril trabajó un rato y recibió a su hijo Hans, con el que charló sobre ciencia y política. A la una de la madrugada del día 18, la enfermera le oyó murmurar en alemán; como no entendía el idioma, las que fueron las últimas palabras de Einstein se perdieron para siempre. En su mesa del hospital quedaron muestras de su trabajo: un cuaderno con ecuaciones y el borrador del discurso de

conmemoración de la independencia de Israel: “Hoy les hablo no como ciudadano estadounidense, ni tampoco como judío, sino como ser humano”.

La recuperación de su cerebro arrojaría en los últimos años un inesperado colofón, que lleva a pensar que Thomas Harvey pudo no haber errado cuando decidió extraerlo. Aunque él no fuera capaz de encontrar nada en él, los exámenes con la tecnología más reciente sí hallaron algunas peculiaridades. “Tenía más células de apoyo –llamadas neuroglucitos– por neurona que la media. Mostraba un patrón poco habitual de cisuras o surcos en los lóbulos parietales, región que se considera importante para las capacidades matemáticas y el razonamiento espacial (...) tal vez nunca sepamos por qué Einstein fue tan creativo e inteligente, pero cabe apostar que parte de su talento se derivó de factores genéticos”, escribieron Jeff Hawkins y Sandra Blakeslee en su tratado sobre la inteligencia. Pero quizá el propio Einstein se hubiera negado a hacer esa apuesta; como escribió en una ocasión: “Yo no tengo ningún talento especial; solo soy apasionadamente curioso”.



Programa de Protección Contra Incendios en las centrales nucleares españolas

■ Texto **Teresa Vázquez Mateos** | Jefa de Área de Análisis Probabilista de Seguridad | ■

El conjunto de elementos que conforman la protección contraincendios en las centrales nucleares constituyen el programa. Los requisitos básicos se definen en la Instrucción IS-30 del CSN, que provienen, fundamentalmente, de la normativa exigida a las centrales USA, completados con los niveles de referencia WENRA, sin olvidar la especificidad de las centrales nucleares españolas.

La definición de los elementos que conforman el programa deriva de la aplicación del concepto de defensa en profundidad para la protección contraincendios, de forma que se garantiza la operación segura en caso de incendio y la protección frente al fuego de los elementos importantes para seguridad y de la instalación en su conjunto.

Se aplican sucesivas capas para: asegurar la prevención y minimizar la ocurrencia de fuegos y explosiones; detectarlo rápidamente, si se produce, y conseguir su extinción tan rápido como sea posible; por último, en caso de no ser extinguido, limitar el daño mediante su confinamiento en áreas de fuego que permitan separar y proteger las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad, de forma que se pueda asegurar la capacidad para parada segura, minimizando, además, la posibilidad de liberaciones radiactivas al exterior. Adicionalmente, en aplicación de los criterios básicos de diseño,

Se garantiza la operación segura en caso de incendio y la protección frente al fuego de los elementos importantes para la seguridad y de la instalación en su conjunto

un incendio no debe impedir el éxito de las funciones de seguridad.

Para hacer efectivas cada una de las capas anteriores se deben definir los elementos necesarios para disponer de un programa de Protección Contra Incendios (PCI) robusto.

Elementos del programa

Los elementos para la prevención contemplan aspectos de diseño, establecimiento de medidas administrativas, avisos, controles y vigilancias de actividades, entrenamiento y formación del personal

Un programa de pruebas y vigilancias, mantenimiento de sistemas, y de calidad permiten garantizar los elementos a lo largo del tiempo

para el conocimiento de los riesgos de incendio y la manera de evitarlos, etc.

En lo que se refiere a los elementos que permiten la detección y extinción rápida del fuego, este programa contempla distintos niveles de actuación para disponer de sistemas de detección y alarma según los riesgos previstos y el contenido del área; asimismo, sistemas de extinción acordes con las características del área de fuego, con volumen para suministro y reposición adecuado, que garantice los medios necesarios en las peores condiciones, incluso en caso de sismo.

Otro elemento es la organización para la lucha contra el fuego que incluya una brigada de PCI en la central entrenada, formada, con procedimientos y estrategias para hacer frente, de forma inmediata, a cualquier incendio, con los acuerdos necesarios para ser apoyada por organizaciones externas ante las peores condiciones.

La tercera capa de defensa se refiere a los elementos que permiten justificar (elementos de protección, análisis, procedimientos, etc.) que, en caso de incendio en un área, es posible alcanzar y mantener la capacidad de parada segura de la instalación y minimizar las emisiones radiactivas.

Por último, un programa de pruebas y vigilancias, mantenimiento de sistemas, controles administrativos y un programa de garantía de calidad permiten garantizar los elementos a lo largo del tiempo. 

Elementos del programa de protección contra incendios

PREVENCIÓN

Minimizar el potencial de incendios y explosiones.

ENTRENAMIENTO Y SIMULACRO DE INCENDIOS
Las centrales nucleares entrenan a su personal en seguridad contra incendios, incluyendo ejercicios regulares.



INSPECTOR RESIDENTE
Los inspectores residentes de la NRC realizan inspecciones específicas de seguridad contra incendios cada 3 meses, además de una inspección anual adicional.

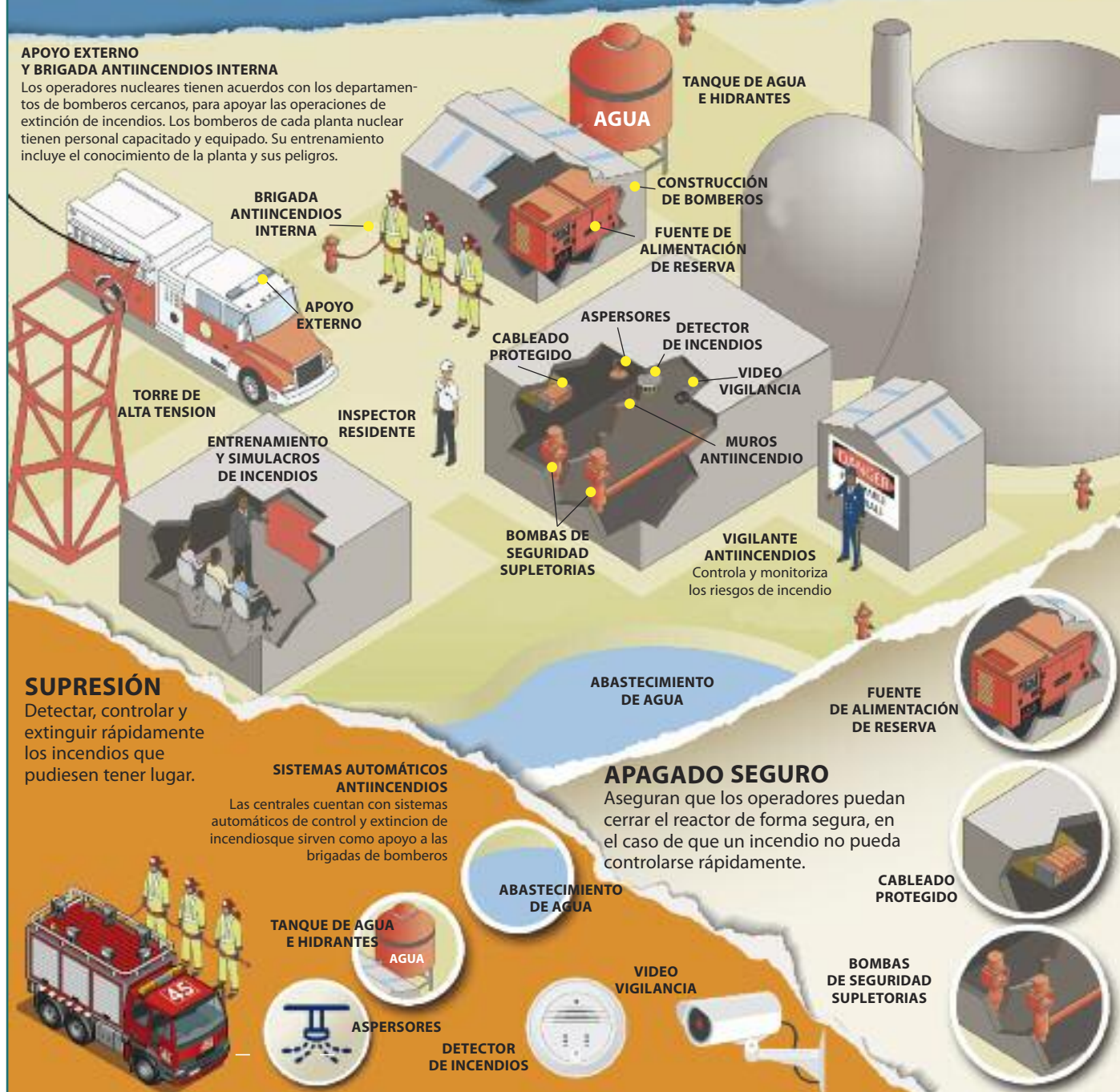


VIGILANTE ANTIINCENDIOS
El personal de las centrales nucleares controla los riesgos de incendio, como el almacenamiento de combustibles, y las fuentes de ignición, como el corte y soldadura de metales.



APOYO EXTERNO Y BRIGADA ANTIINCENDIOS INTERNA

Los operadores nucleares tienen acuerdos con los departamentos de bomberos cercanos, para apoyar las operaciones de extinción de incendios. Los bomberos de cada planta nuclear tienen personal capacitado y equipado. Su entrenamiento incluye el conocimiento de la planta y sus peligros.



Fuente: NRC



El CyberKnife incorpora los avances en tecnología robótica y en procesamiento de imágenes computarizada para realizar radiocirugía guiada por imagen.

Cyberknife, la máquina que ha conseguido una revolución en los quirófanos

La radiocirugía sin bisturí

Durante el último medio siglo, la radiocirugía robotizada se ha convertido en una alternativa ventajosa para tratar tumores pequeños en el cerebro y en otras partes del cuerpo. El Cyberknife, uno de los sistemas más polivalentes y evolucionados, es un tratamiento con radiaciones, indoloro,

preciso, eficaz y con pocos efectos secundarios. Está disponible en varios centros hospitalarios públicos y privados de España, y se aplica de forma ambulatoria.

■ Texto **Gonzalo Casino** | Periodista científico | ■

A pesar de su nombre, el sistema de radiocirugía Cyberknife no es un procedimiento quirúrgico. No emplea ningún “cuchillo” o bisturí, ni realiza incisión alguna. Es, en realidad, un sofisticado sistema roboti-

zado de radioterapia, desarrollado en la década de 1990, para reducir o eliminar lesiones pequeñas y difícilmente accesibles mediante la cirugía convencional. Se utiliza, principalmente, para tratar tumores del cerebro, pero también cán-

ceres de hígado, pulmón y próstata, e incluso malformaciones vasculares y otras enfermedades, como el Parkinson. Como es usual en los procedimientos de radioterapia, el tratamiento se aplica con el paciente despierto, en una

o en varias sesiones, al final de las cuales puede regresar a su casa y reemprender al día siguiente sus actividades cotidianas con normalidad.

Una de las características más destacables de la radiocirugía con Cyberknife es su precisión submilimétrica (menor de 1 mm), lo que permite irradiar con seguridad el tejido enfermo y minimizar el daño a los tejidos sanos de alrededor. Esta ventaja hace que el procedimiento sea recomendable para tratar tumores que están muy cerca de estructuras anatómicas vitales o para aquellas personas para las que la cirugía abierta convencional representa un riesgo demasiado alto, ya sea por su edad o por su situación de enfermedad. Otra de sus ventajas es la posibilidad de tratar a los pacientes de forma ambulatoria, sin ingresos hospitalarios. En todo el mundo ya hay varios centenares de miles de pacientes tratados.

Si comparamos un tratamiento estándar de radiocirugía de un tumor cerebral mediante Cyberknife con la cirugía abierta del cráneo para el mismo tumor, las diferencias son ostensibles, especialmente desde la perspectiva del paciente. De entrada, no tiene nada que ver una sesión de radioterapia, absolutamente indolora y sin necesidad de anestesia, con una operación convencional, que requiere la apertura del cráneo para acceder al tumor y precisa un periodo de hospitalización de unas dos semanas de promedio.

Las ventajas de Cyberknife para el tratamiento de lesiones dentro y fuera del cráneo fueron reconocidas en la *Revisión sistemática de la eficacia y seguridad del Cyberknife: indicaciones y resultados en el tratamiento de lesiones intra y extracraneales*, realizada en 2008 por María José López-Pedraza Gómez, Nieves Calcerrada Díaz-Santos y Juan Antonio Blasco Amaro, de la Unidad de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de

la Agencia Laín Entralgo. En esta revisión, que representa una referencia de alta calidad para el uso de esta tecnología médica, se resumían así sus ventajas: “La técnica no es invasiva, el brazo robótico tiene gran flexibilidad de movimiento para mejorar la accesibilidad al volumen blanco, los tubos de radiodiagnóstico permiten obtener en tiempo real imágenes con la posición de la lesión durante el tratamiento y el disponer de un sistema de seguimiento dinámico para los tumores que se desplazan en el ciclo de la respiración evita las técnicas de contención de respiración”.

El tratamiento con Cyberknife evita además las principales complicaciones

Podemos definir el sistema CyberKnife como un tratamiento de última generación y máxima precisión para el tratamiento del cáncer, evitando las complicaciones de una cirugía abierta

propias de la cirugía, como son la hemorragia y la infección. Sin embargo, tampoco es la panacea, puesto que este tipo de radioterapia no elimina físicamente el tumor, sino que solo lo reduce y evita su crecimiento. Como todos los tratamientos, tiene sus ventajas e inconvenientes. Pero, antes de profundizar en ellos, conviene precisar qué es exactamente la radiocirugía, cómo es un equipo de Cyberknife y cómo se lleva a cabo un tratamiento de estas características.

El concepto de radiocirugía

El sistema Cyberknife representa un estadio evolucionado del concepto de radiocirugía, introducido en 1951 por el

neurocirujano sueco Lars Leksell para designar la aplicación de radiaciones ionizantes a la hora de tratar lesiones intracraneales de reducidas dimensiones. En un principio, la localización de la zona de la lesión se conseguía mediante la utilización de mecanismos invasivos de fijación de la cabeza, denominados marcos estereotáxicos, que son unos armazones rígidos con pinchos o punzones que se aplican sobre el cráneo para inmovilizarlo y requieren al menos anestesia local. El uso de estos dispositivos, junto con la obtención de imágenes radiológicas del interior del cráneo para localizar la lesión, es lo que permitió, a mediados del siglo XX, inaugurar la neurocirugía estereotáxica y, posteriormente, la radiocirugía.

La técnica ha evolucionado mucho desde entonces hasta llegar a los sistemas más modernos de radiocirugía estereotáxica (SRS, por sus siglas en inglés), entre ellos el Cyberknife, desarrollado en 1994. Una de las características distintivas de este sistema es que no utiliza ningún marco estereotáxico, con lo cual no precisa siquiera la aplicación de anestesia local.

La localización de la lesión se realiza mediante sofisticados sistemas de imagen computerizada combinados con los avances de la tecnología robótica, lo que permite, por un lado, obtener unas coordenadas tridimensionales de la lesión y, por otra, aplicar con precisión una radiación de rayos X producidos en un acelerador lineal.

Componentes del sistema

El sistema Cyberknife está integrado por tres componentes principales. El primero es un acelerador lineal (LINAC), ligero –de unos 130 kg de peso–, montado sobre un brazo robótico que permite aplicar la radiación con una gran precisión. El segundo son dos tubos de radiodiagnóstico que guían la

radioterapia en tiempo real, colocados en el techo de la sala de tratamiento y acoplados con detectores de imágenes digitales orientados hacia el paciente. Y el tercero, una mesa sobre la que está tumbado el paciente, manejada por un segundo robot, que la mueve en torno a cinco ejes para fijar la posición de tratamiento.

Todo el sistema está computerizado y se controla a distancia, de tal modo que en la sala de tratamiento solo es necesario que esté el enfermo. El brazo robótico permite colocar el acelerador lineal sobre el paciente en incontables posiciones distintas, ya que puede moverse con seis grados de libertad (movimientos hacia delante y detrás, arriba y abajo, izquierda y derecha, combinados con movimientos de rotación sobre tres ejes perpendiculares). Los tubos de radiodiagnóstico del techo acoplados a los detectores de imágenes permiten fijar exactamente la posición del acelerador lineal sin necesidad de utilizar un marco estereotáxico.

En las lesiones intracraneales, para inmovilizar la cabeza y el cuello del paciente se recurre a máscaras termoplásticas. Estos dispositivos de sujeción son indolores y se moldean rápidamente antes del tratamiento a medida de cada paciente. En el caso de lesiones fuera de la cabeza, se usan medios de inmovilización de todo el cuerpo, como colchones de vacío o cunas de espuma rígida.

Para que el sistema pueda aplicar con precisión la radiación ionizante de rayos X sobre la lesión, se utilizan como referencia puntos radiográficos internos. Estos puntos pueden ser estructuras óseas concretas de la cabeza o bien de la columna vertebral; en ambos casos la precisión del sistema es de 0,9 mm. En otras ocasiones, se opta por implantar cerca de la lesión marcas radiológicamente opacas, denominadas fiduciales. Generalmente se trata de pequeñas

*Todo el sistema está
computerizado y se controla
a distancia, de tal modo que
en la sala de tratamiento
sólo es necesario que
esté el enfermo durante
la sesión*

semillas de oro de 5 mm de largo por 1 mm de diámetro, de tal manera que gracias a estas marcas el sistema puede seguir el punto de tratamiento a pesar de que se produzca cualquier desplazamiento o giro del tumor.

Tratamiento y coste económico

La radioterapia con Cyberknife es un tratamiento sofisticado que requiere la intervención de un equipo multidisciplinar integrado por radiólogos, cirujanos, oncólogos, radiofísicos, etc. El sistema es complejo y requiere un alto grado de especialización, colaboración y experiencia para manejarlo.

Una de las claves de la administración del tratamiento es comparar las imágenes de la lesión que ofrecen los tubos de radiodiagnóstico de Cyberknife con las imágenes previas de la lesión que se han usado para diagnosticarla. El sistema realiza automáticamente esta

*El coste de los tratamientos
depende mucho
del número de pacientes
tratados anualmente
en cada equipo
de Cyberknife*

comparativa, teniendo en cuenta la posición del paciente sobre la mesa y cualquier pequeño movimiento que pueda realizar, ya que se encuentra despierto. Una sesión de radiocirugía suele durar entre 30 y 90 minutos, dependiendo de las características de la lesión, de la dosis administrada y de la colaboración del paciente.

El coste de los tratamientos depende mucho del número de pacientes tratados anualmente en cada equipo de Cyberknife. Según la revisión sistemática de la Agencia Laín Entralgo, el precio por enfermo tratado oscila entre los 20.000 euros, cuando se tratan unos 40 pacientes al año, y algo más de 2.000 euros, cuando se tratan más de 300 pacientes al año.

El problema de la respiración

Gracias a sus soluciones innovadoras, Cyberknife no solo ha eliminado la necesidad de sujetar al paciente de forma invasiva, sino que también ha permitido aplicar la radiación en lesiones tumorales situadas en zonas del organismo afectadas por los movimientos respiratorios, como son el pulmón, el hígado, el páncreas y la próstata.

Lo que ha abierto estas nuevas posibilidades es un programa informático de trazado dinámico (*dynamic tracking software* o DTS) que procesa las imágenes de la lesión en tiempo real y comunica sus desplazamientos al brazo robótico que dirige el acelerador lineal. Gracias a esta solución, la radioterapia se puede aplicar con una gran precisión a pesar de que el paciente esté respirando libremente, pues el sistema se ajusta permanentemente a los desplazamientos provocados por la respiración y los cambios de ritmo respiratorio.

Indicaciones y efectos secundarios

El primer prototipo desarrollado en 1994 amplió las posibilidades de la ra-

dioterapia con la incorporación de un brazo robótico con seis grados de libertad para aplicar la radiación. Inicialmente se utilizó para tratar solo lesiones intracraneales, aunque con la gran ventaja de no tener que utilizar marco estereotáxico. Pero no fue hasta 2001 cuando una nueva generación de Cyberknife incorporó el programa dinámico DTS para el procesamiento de imágenes di-

gitales de la lesión en tiempo real para tratar tumores en todo el cuerpo.

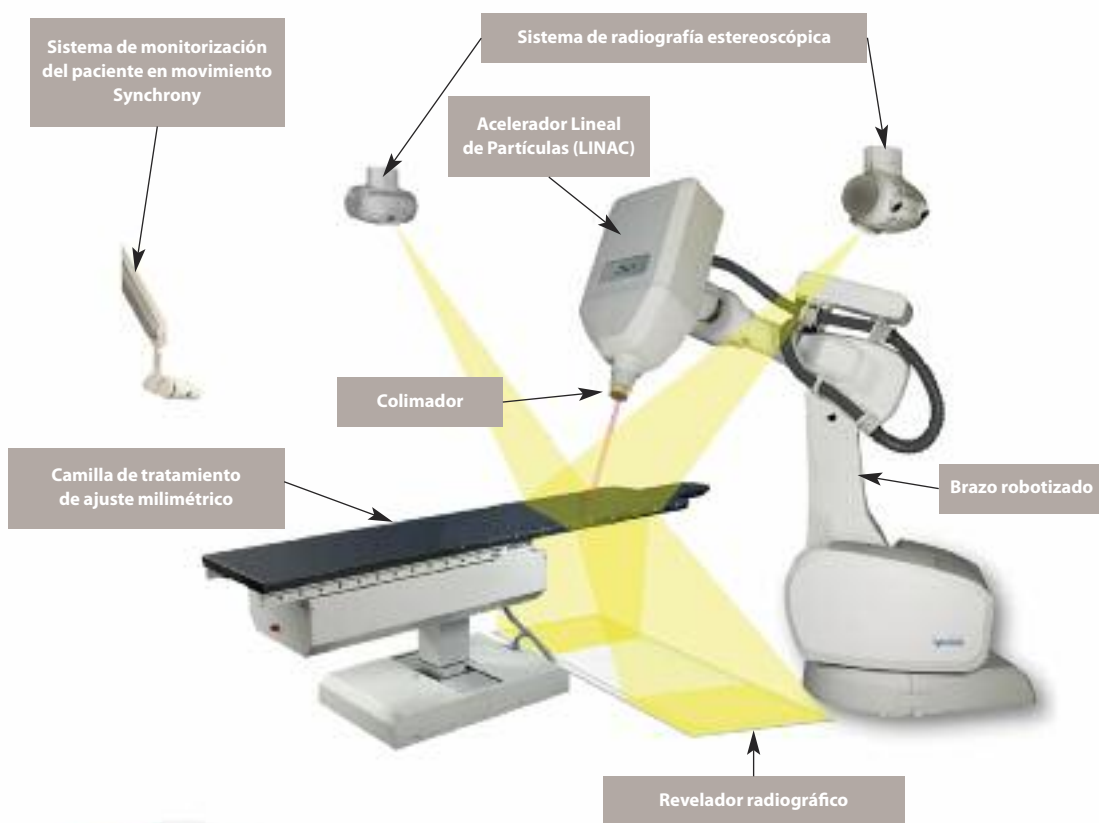
Ese mismo año, la agencia del medicamento estadounidense, la Food and Drug Administration (FDA), aprobó el Cyberknife para el tratamiento de radiocirugía de lesiones situadas en cualquier parte del cuerpo. Y un año después, en 2002, fue aprobado en Europa para tratar todo tipo de lesiones dentro

y fuera del cráneo que requieran la administración de radiaciones.

Actualmente, entre los tumores del cerebro y del sistema nervioso susceptibles de ser tratados con sistema de radiocirugía se incluyen los de la medula espinal y de la pituitaria, los del nervio acústico y todo tipo de metástasis cerebrales de cánceres originados en otras partes del cuerpo. También son suscep-

ASÍ FUNCIONA EL CYBERKNIFE

La radiocirugía Cyberknife es una técnica médica que, sin necesidad de intervención quirúrgica, permite, con gran precisión tratar tumores localizados en el hígado, el pulmón o la columna, entre otros.



El sistema de guía de imagen es el elemento esencial del Cyberknife. Por medio de la radiografía estereoscópica se obtienen imágenes de rayos X en tiempo real, para guiar el haz de partículas que eliminarán las células tumorales. El sistema de monitorización Synchrony

permite acompañar los movimientos del Cyberknife con los del paciente, lo que permite sincronizar la respiración y otros movimientos involuntarios. Gracias al potente brazo robótico, el Cyberknife es capaz de dirigir el haz de partículas eficazmente hacia cualquier parte de la anatomía e iniciar el tratamiento.

DETALLES DEL TRATAMIENTO

AUTÓNOMA

La intervención del médico se limita solo a comprobar que, durante el tratamiento, todo marcha bien. Es decir, es la máquina la que examina el tumor y, si no lo localiza, para y pide ayuda. Todo lo hace de forma automática y gracias a la tecnología extraída del seguimiento de análisis de imagen.

PROBADA

Más de 90.000 pacientes han sido tratados con el sistema Cyberknife en todo el mundo en los centros que disponen de esta tecnología.

TECNOLOGÍA

El sistema de visión fue creado en Silicon Valley (al norte de California), con los algoritmos de compresión de imagen propios de la industria del video.

EXACTITUD

La precisión del tratamiento hace que no sea necesario el uso de una sujeción en los casos de tumores en el cerebro. La cabeza se sujeta e inmoviliza con una máscara.

EN ESPAÑA

En 2002 se autorizó la utilización de este dispositivo para tumores situados fuera de la cabeza. El primer Cyberknife llegó a España en 2006. Lo adquirió el Hospital Ruber Internacional (Madrid) y, desde entonces se han tratado con él más de mil lesiones tumorales, la mayor parte de ellas localizadas en el pulmón.

Historia de la radiocirugía

La aparición de la radiocirugía en 1951 hay que atribuirla al neurocirujano Lars Leksell y al radiofísico Börje Larsson, ambos suecos, que idearon en 1951 un sistema para tratar algunas enfermedades funcionales y orgánicas del cerebro con un método poco invasivo. El nuevo procedimiento consistía en irradiar lesiones intracraneales de reducidas dimensiones mediante haces convergentes de radiaciones ionizantes. El sistema no tenía los riesgos de la cirugía abierta pero mantenía la precisión quirúrgica, por lo que se denominó radiocirugía..

En un principio, la radioterapia se aplicó para tratar enfermedades consideradas funcionales, como la enfermedad de Parkinson y los trastornos obsesivo-compulsivos, pero con el tiempo fue ampliando su campo de indicaciones a una gran diversidad de tumores benignos y malignos y malformaciones vasculares cerebrales. Asimismo, las fuentes de partículas ionizantes utilizadas han sido diversas: desde los generadores de rayos X a los ciclotrones generadores de protones.

El propio Leksell completó en 1967 el desarrollo del primer equipo dedicado exclusivamente a la cirugía cerebral, bautizado como Gamma Knife. El equipo original contenía 170 fuentes de cobalto, cuyos haces de partículas se podían colimar o concentrar en un punto determinado del espacio. Estos equipos han evolucionado con los años y las nuevas generaciones incluyen muchas más fuentes de cobalto que emiten radiación gamma.

La radiocirugía con acelerador lineal (LINAC) irrumpió en la década de 1980, utilizando rayos X de alto voltaje como fuente radiactiva. El primer acelerador lineal comercial para uso exclusivo en radiocirugía fue introducido por Jay Loeffler en 1982 en el Joint Center for Radiation Therapy de Boston. Con el tiempo, esta tecnología ha ido incorporando algunos métodos propios de la radioterapia, como es el fraccionamiento de la sesiones, a la vez que ha ido extendiendo su campo de aplicaciones a lesiones extracraneales.

La aparición de Ciberknife en la década de 1990 representó un salto cualitativo con la incorporación del acelerador lineal a un brazo robótico dotado de seis grados de libertad y el posterior desarrollo e incorporación al sistema, ya en 2001, de un programa informático dinámico para aplicar con precisión la radioterapia a una lesión que no está absolutamente quieta.

Desde el primer prototipo de Ciberknife, instalado en 1994 en el Centro Médico de la Universidad de Stanford (Stanford University), hasta las últimas generaciones del sistema, disponibles ya en muchos centros hospitalarios de España, Europa y otras regiones del mundo, ha habido un perfeccionamiento continuo de la tecnología. Pero la idea sigue siendo la misma: aplicar tratamientos de radiaciones ionizantes con precisión y maniobrabilidad quirúrgicas a una gran variedad de lesiones sin tener que hacer la más mínima incisión. ▀

tibles de tratamiento los cánceres de pulmón, mama, riñón, hígado, páncreas y próstata, entre otros, además de algunos melanomas que afectan al ojo.

En 2014, se anunció que el sistema Cyberknife se había utilizado con éxito en el UT Southwestern Medical Center de Dallas (Estados Unidos) para eliminar por primera vez un tumor canceroso de las cuerdas vocales en 15 sesiones.

La gama de indicaciones se extiende además a otras enfermedades neurológicas, como la enfermedad de Parkinson, algunos tipos de epilepsia y la neuralgia del nervio trigémino, que produce un dolor insoportable en la cara. Asimismo es una técnica indicada para tratar con radiaciones algunas malformaciones vasculares, cuyo tratamiento mediante cirugía convencional comporta riesgos mayores. En todas estas indicaciones, los principales riesgos que asume el paciente son la aparición de edema (hinchazón) en la zona tratada, así como dolores de cabeza, cansancio, náuseas y vómitos.

Cánceres de pulmón y próstata

En el caso del cáncer de pulmón, la radiocirugía se ha introducido con fuerza como una terapia alternativa o complementaria a la cirugía convencional. De hecho, los resultados del primer ensayo clínico que comparaba ambas terapias, dados a conocer en mayo de 2015, indicaban que la radioterapia conseguía en conjunto una supervivencia igual o mejor que la cirugía en el caso de tumores incipientes.

"Por primera vez, podemos decir que las dos terapias son al menos igualmente eficaces y que la radioterapia parece ser mejor tolerada, lo que podría conducir a mejores resultados de supervivencia para estos pacientes", manifestó el primer autor y principal investigador Joe Y. Chang, profesor de

Radiación Oncológica en el MD Anderson Cancer Center de Texas (Estados Unidos).

El cáncer de próstata es otro de los grandes beneficiados por este sistema de radiocirugía. Tanto es así que, según Accuracy, uno de los proveedores mundiales de equipos de radiocirugía, el 85 por ciento de los centros europeos que tienen un equipo de Cyberknife lo utilizan para tratar cánceres de próstata. "Más del 25 por ciento de los pacientes tratados con CyberKnife sufren un cáncer de próstata, y está previsto que esta cifra crezca", reconoció, en 2011, David Feltl, jefe del departamento de Oncología del Hospital Universitario de Ostrava, en la República Checa.

El primer estudio de un centenar de casos de tratamiento de cáncer de próstata realizados con Cyberknife en un mismo centro (*A single-center study of 100 consecutive patients with localized prostate cancer treated with stereotactic body radiotherapy*), publicado en la revista BMC Urology en 2013 por el grupo de Giampaolo Bolzicco, mostró resultados prometedores, con una buena respuesta de los niveles de antígeno prostático (PSA) y buena tolerancia por parte de los pacientes.

Limitaciones y desventajas

Una diferencia esencial entre el tratamiento quirúrgico convencional de un tumor y la radiocirugía con Cyberknife es que este último procedimiento no elimina el tumor, sino que solo impide su crecimiento. Por ello, generalmente solo es ventajoso para tratar tumores menores de tres centímetros. Esto es así porque, por un lado, harían falta dosis muy grandes de radiación para tratar un tumor grande, con el consiguiente riesgo de afectación de las zonas corporales sanas; y, por otro, porque cuando un tumor es muy grande, la propia masa del tumor causa problemas por la



La precisión del tratamiento del Cyberknife hace que no sea necesario el uso de una sujeción en los casos de tratamiento de tumores en el cerebro.

presión sobre las estructuras anatómicas próximas y hace falta practicar al menos una cirugía abierta reductora.

El tiempo que tardan en apreciarse los efectos de la radioterapia no es tan inmediato como en la cirugía convencional, sino que pueden transcurrir semanas o meses. En el caso de las malfor-

maciones arteriovenosas pueden tardarse hasta dos años en alcanzarse los efectos deseados. Además, durante este tiempo el paciente tiene un riesgo más elevado de sangrado. En algunas situaciones, para minimizar estas limitaciones y desventajas, la radiocirugía debe aplicarse de forma combinada con la cirugía convencional.

De hecho, el fraccionamiento de la radiocirugía en varias sesiones consigue una mayor eficacia terapéutica, tal y como se hace con la radioterapia. No en vano, la radiocirugía con Cyberknife no es sino una sofisticada forma de aplicar con precisión radiaciones ionizantes de rayos X para tratar diferentes tumores y otras lesiones en todo el cuerpo, en una o varias sesiones, tal y como se hace en radioterapia.

Una diferencia entre la cirugía convencional de un tumor y la radiocirugía con Cyberknife es que éste no elimina el tumor, sino que solo impide su crecimiento

Permite la estimación de la exposición a la radiaciones ionizantes y sus efectos biológicos

Análisis de la dosimetría biológica en España y en el entorno internacional

Dentro del campo de la protección radiológica, podemos hablar de diferentes tipos de dosimetría, entre ellas, la física y la biológica. Se entiende por *Dosimetría Física (DF)* aquella que mide, mediante dosímetros físicos, las dosis ambientales y/o individuales, mientras que la *Dosimetría Biológica (DB)* es aquella que evalúa cuantitativamente la gravedad de una exposición a las radiaciones ionizantes mediante procedimientos biológicos acreditados, como por ejemplo el análisis de aberraciones cromosómicas. La estimación de las dosis oficiales de los trabajadores expuestos se basa en la dosimetría física, mientras que la dosimetría biológica se utiliza como medida de apoyo en aquellos casos de registros de dosis inexplicables o bien cuando el trabajador no disponga de un sistema de dosimetría física.

Por otra parte, el desarrollo de la DB se encuentra vinculado a accidentes radiológicos y/o nucleares proporcionando un dato importante en la evaluación dosimétrica de los miembros del público involucrados y del posterior protocolo médico a aplicar. Dicha determinación provee un dato más dentro del conjunto de la información necesaria para la

evaluación de una sobreexposición accidental, complementando las estimaciones dosimétricas realizadas por métodos físicos. En ciertos casos, por falta de registros físicos de la dosis o por imprecisa reconstrucción del escenario de sobreexposición, constituye la única evaluación posible.

A lo largo de los últimos años, se ha detectado que podría existir cierta confusión a nivel nacional en relación con la finalidad de este tipo de dosimetría, con cuáles son los requisitos aplicables a los laboratorios que realizan la misma y con el papel del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en este proceso.

■ Texto **Carmen Álvarez García** | Jefa de Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas | **Ignacio Amor Calvo** | Jefe de Área de Servicios de Protección Radiológica | **Miguel Calvín Cuartero** | Subdirector de Emergencias y Seguridad Física | **Ana Hernández Álvarez** | Consejera técnica | **Mª Jesús Muñoz González** | Consejera técnica | **Ana Hernández Álvarez** | Consejera técnica | **Mª Jesús Muñoz González** | Jefa de U.A. gabinete de la Dirección Técnica de Protección Radiológica | **Mª Fernanda Sánchez Ojanguren** | Directora técnica de Protección Radiológica | **Javier Zarzuela Jiménez** | Subdirector de Protección Radiológica Operacional | ■

La determinación de las dosis individuales recibidas por los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes se realiza mediante procedimientos físicos (dosímetros individuales o de área provistos de detectores que permiten estimar las dosis recibidas gracias a la correlación entre la variación de un determinado parámetro físico y la radiación recibida).

Circunstancialmente, se utilizan métodos que se basan en los efectos biológicos producidos por las radiaciones para estimar las dosis recibidas por individuos tras su exposición a radiacio-

nes ionizantes. Es lo que se conoce como Dosimetría Biológica (DB). En estos casos, se establece una correlación entre la variación de un parámetro biológico y las dosis recibidas.

En cualquier caso, y como ya se ha indicado anteriormente, la DB cobra especial relevancia en caso de situaciones en las que podría haberse producido exposición a las radiaciones y no se dispone de dosimetría física. En este sentido, un ejemplo sería el de un trabajador expuesto que no dispone, en el momento de la exposición, de un sistema de dosimetría física o bien miembros del públi-

co expuestos a radiaciones ionizantes de forma accidental y en emergencias radiológicas y nucleares. En estos casos, el papel de la DB sería verificar si la exposición se ha producido y, en caso afirmativo, estimar la dosis recibida en función del tipo de radiación.

Este tipo de dosimetría es una herramienta básica en caso de emergencia, concretamente en el caso de atención a irradiados o contaminados, ya que permite inferir las posibles dosis recibidas por el afectado y constituye la base del protocolo médico a seguir ante una sobreexposición.

Por ello, los laboratorios de DB constituyen, además, un apoyo fundamental para los servicios de asistencia a los lesionados y contaminados por isótopos radiactivos y radiaciones ionizantes de nivel II¹ (en adelante, centros de atención de nivel II). Dichos laboratorios podrían ser propios o contratados.

Entorno Internacional y Nacional

La DB se utiliza desde mediados de los años 60 del siglo pasado para la estimación de las dosis en los casos en los que no se dispone de dosimetría física y está ligada a la evaluación de dosis del público en los casos de accidente o emergencia nuclear o radiológica. Es por ello que, tanto a nivel nacional como internacional, su desarrollo está ligado con los organismos u organizaciones con competencia o implicados en estas materias.

a) Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

La hoy arraigada participación del OIEA en cuestiones de dosimetría biológica se inició en 1978. La vinculación se produjo a través de proyectos coordinados de investigación, la realización de cursos de formación, regionales y nacionales, el patrocinio de becas de formación personales y la ayuda para la puesta en marcha de laboratorios en los Estados miembros. El objetivo era disponer de capacidad de infraestructuras en materia de dosimetría biológica, para su utilización como herramienta de apoyo en caso de emergencia nuclear o radiológica.

Asimismo, se establecieron las bases para proporcionar asesoramiento a los Estados miembros acerca de los aspectos en los que sería necesario centrar las investigaciones, y sobre las técnicas más adecuadas en cada caso en materia de dosimetría biológica.

En 1986, bajo los auspicios del OIEA, se firmaron dos Convenciones que esta-

blecieron el marco jurídico para la cooperación y coordinación internacionales en caso de emergencia nuclear o radiológica: *la Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica (Convención sobre asistencia) y la Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares*².

Estas Convenciones establecen un sistema de notificación de los accidentes nucleares que pueden dar lugar a emisiones transfronterizas de importancia para la seguridad radiológica de otro Estado y crean un marco internacional para la cooperación entre las Partes y con el Organismo con el fin de facilitar la pronta prestación de asistencia y apoyo en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica. En junio de 2004, la Junta de Gobernadores aprobó un Plan de Acción Internacional destinado al fortalecimiento del sistema internacional de preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear y radiológica. España es Parte de ambas Convenciones.

En el artículo 5a ii) de la *Convención sobre asistencia* se establece como una de las funciones del OIEA recabar información sobre metodologías, técnicas y resultados de investigación disponibles en relación

con la respuesta a este tipo de emergencias, y difundirla entre firmantes de la misma.

En este contexto, el OIEA sigue implicado en los temas relacionados con la dosimetría biológica. Un ejemplo es su participación en la creación y coordinación de las redes de laboratorios de DB.

b) Organización Mundial de la Salud

Dentro del marco de la *Convención sobre asistencia*, citado en el punto anterior, y a fin de poder cumplir con las funciones que le han sido encomendadas, el OIEA colabora con otras organizaciones internacionales, entre las que se encuentra la OMS (esta organización forma parte del Comité Interinstitucional para la Intervención en Casos de Accidentes Nucleares - IACRNA)³.

Concretamente, el OIEA y la OMS mantienen una estrecha colaboración, entre otros temas, en aquellos relacionados con la dosimetría biológica. Prueba de ello es la creación de la Red BioDoseNet (año 2007) por la OMS a instancias del OIEA.

BioDoseNet es una red mundial de laboratorios de dosimetría biológica cuyo papel es apoyar la gestión y la toma de decisiones en casos de emergencias nuclea-



El desarrollo de la dosimetría biológica se encuentra vinculado a accidentes radiológicos y/o nucleares.

res o radiactivas que afecten a un gran número de personas.

c) Organización nacional

Los diferentes Estados deben disponer de los recursos necesarios para responder de forma adecuada a una emergencia nuclear o radiológica. Uno de estos recursos sería un laboratorio de DB que permita estimar las dosis recibidas por los posibles afectados. Concretamente, en el caso de España, en el Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN), anexo VI Medios materiales y recursos, los laboratorios de DB se incluyen dentro de los medios o recursos a proporcionar por las autoridades sanitarias de las Comunidades Autónomas.

En lo que se refiere a la estructura establecida dentro de cada país en cuanto a la disponibilidad este tipo de laboratorios,

nos encontramos con diferentes modelos.

En algunos países es el organismo regulador en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, de acuerdo con el modelo de organismo regulador adoptado, quien dispone de un laboratorio propio para la realización de DB. Este es el caso de Argentina, donde la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) dispone de un laboratorio propio, el Laboratorio de Dosimetría Biológica (LDB).

En otros casos, como España, el CSN no dispone de ningún tipo de laboratorios propios en apoyo de su labor reguladora.

De acuerdo con el artículo 2 f) de la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, se encomienda al CSN la función de: “(...) *Coordinar, para todos los aspectos relacionados con la seguridad nuclear y la protección radiológica, las medidas de*

apoyo y respuesta a las situaciones de emergencia, integrando y coordinando a los diversos organismos y empresas públicas o privadas cuyo concurso sea necesario para el cumplimiento de las funciones atribuidas a este Organismo (...)”.

La tarea de coordinación de las infraestructuras nacionales, de acuerdo con el modelo de organismo regulador adoptado, no exige que el CSN disponga de laboratorios propios.

En este ámbito el CSN, con carácter voluntario, ha establecido un acuerdo de colaboración con el Hospital General Universitario Gregorio Marañón (HGUGM), que dispone del único laboratorio acreditado en España. El Acuerdo tiene como objeto que el HGUGM “(...) *mantenga operativas las técnicas de dosimetría biológica que permitan conocer las dosis recibidas por las personas afectadas en situaciones anómalas (incidentes) o excepcionales (accidentes o por actos malintencionados) derivadas del uso de las radiaciones ionizantes (...)*”.

El Consejo de Seguridad Nuclear ha establecido acuerdos similares en otros ámbitos, como por ejemplo, para las unidades móviles del Ciemat y la Universidad de Extremadura, gestión de residuos, etc.

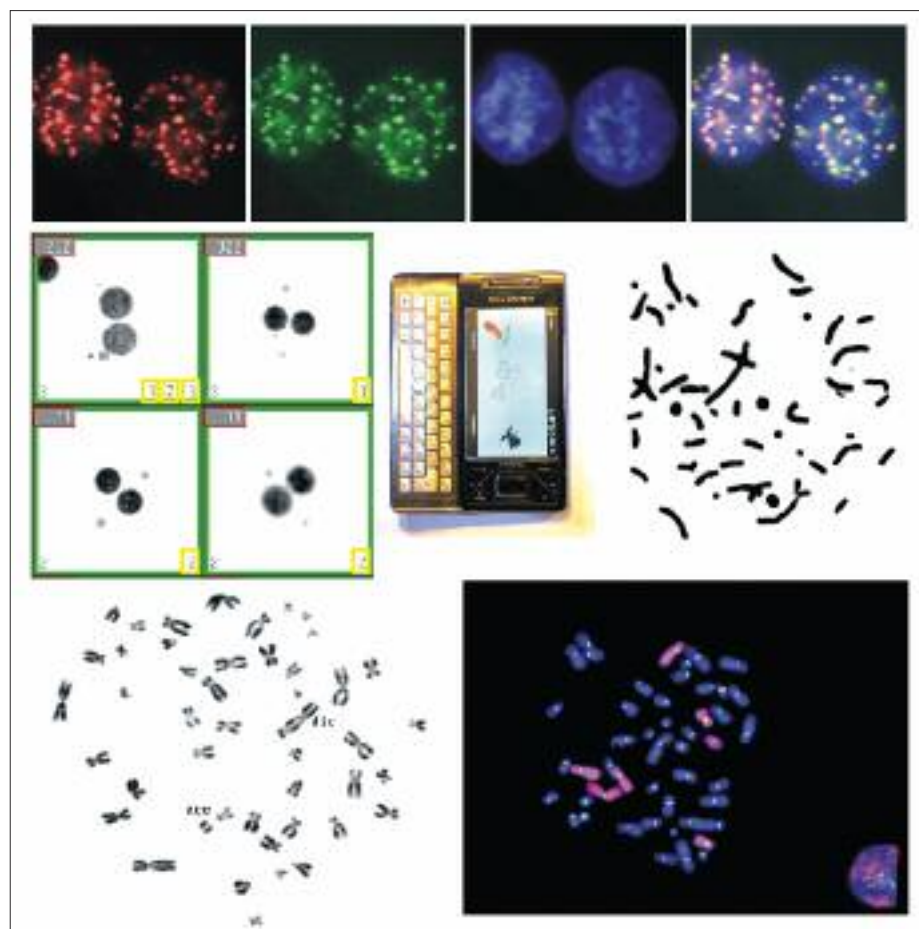
Marco legal aplicable

Servicios de Dosimetría Personal versus laboratorios de Dosimetría Biológica

Lo primero que conviene destacar es que, por motivos reglamentarios y conceptuales, los laboratorios de Dosimetría Biológica (DB) no pueden ser considerados Servicios de Dosimetría Personal (SDP).

De acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), artículo 27 que:

“1. Las dosis recibidas por los trabajadores expuestos deberán determinarse de acuerdo con lo establecido en los



Los laboratorios de DB han desarrollado técnicas para medir determinados parámetros biológicos.

artículos 28 y 29 cuando las condiciones de trabajo sean normales, con una periodicidad no superior a un mes, para la dosimetría externa, y con la periodicidad que, en cada caso, se establezca para la dosimetría interna, de aquellos trabajadores que están expuestos a riesgo de incorporación de radionucleidos.

2. La dosimetría individual, tanto externa como interna, será efectuada por los Servicios de Dosimetría Personal expresamente autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear.”

Los requisitos a cumplir por estos SDP se establecen en la Guía de Seguridad 7.1 “Requisitos técnicos-administrativos para los servicios de dosimetría personal”, basados en la utilización de dosimetría física.

Los laboratorios de DB no cumplen las características para ser considerados como SDP, dado que:

- Las técnicas utilizadas carecen de la fiabilidad necesaria para ser utilizada como dosimetría en condiciones normales de operación (factores de confusión, umbrales de detección, etc.).

- La finalidad de los laboratorios de dosimetría biológica, es la estimación de dosis recibidas por personas potencialmente afectadas por un incidente o accidente radiológico y no disponen de dosimetría física.

El anterior criterio es coherente con lo aplicado en los países de nuestro entorno. No hay constancia de que los laboratorios de DB sean considerados a nivel internacional como SDP. La tendencia en otros países es que estos laboratorios se acrediten en base a los estándares específicos para dosimetría biológica publicados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) o bien, que garanticen la calidad de sus resultados mediante la participación en ejercicios de intercomparación.

Requisitos aplicables a un laboratorio de dosimetría biológica

Los laboratorios de DB son laboratorios que han desarrollado técnicas que permiten medir determinados parámetros biológicos (ejemplo: identificar y cuantificar anomalías cromosómicas radioinducidas).

En España, estos laboratorios realizan sus actividades en el ámbito sanitario y pertenecen o están asociados a los Centros de atención de nivel II, a universidades o a entidades de investigación.

En este sentido, los laboratorios de DB estarían sujetos a las normas aplicables a cualquier otro tipo de laboratorio que

La DB se utiliza desde los años 60 del siglo pasado para la estimación de las dosis en los casos en los que no se dispone de dosimetría física y está ligada a la evaluación de dosis del público en los casos de accidente o emergencia nuclear o radiológica

desarrolle su actividad en el ámbito hospitalario, universitario o de investigación.

El CSN, en apoyo del cumplimiento de sus funciones, concretamente para los casos de incidente o emergencia, ha establecido un acuerdo con el laboratorio de DB perteneciente al Hospital General Universitario Gregorio Marañón (HGUGM), único en España con acreditación ENAC por la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 con alcance a la norma ISO 19238/14 para la realización de ensayos de dicéntricos con fines biodosimétricos.

Este criterio es coherente con la tendencia actual en otros países que, como ya se indicó en el punto 4.1, es que estos laboratorios se acrediten en base a los es-

tándares específicos para dosimetría biológica publicados por la Organización Internacional de Normalización (ISO).

Existen diversos estándares específicos para dosimetría biológica publicados por la Organización Internacional de Normalización (ISO):

- La Norma ISO 21243:2008 *Radiation protection — Performance criteria for laboratories performing cytogenetic triage for assessment of mass casualties in radiological or nuclear emergencies — General principles and application to dicentric assay*, establece los criterios de utilización de la técnica de dicéntricos para estimaciones de dosis en situaciones de emergencia donde es necesario evaluar a un elevado número de personas.

- La Norma ISO 19238:2014 *Radiological protection — Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics*, establece los criterios estándar para los laboratorios que realizan dosimetría biológica mediante técnicas citogenéticas, concretamente basadas en la detección de aberraciones cromosómicas.

- La Norma ISO 17099:2014 *Radiological protection — Performance criteria for laboratories using the cytokinesis block micronucleus (CBMN) assay in peripheral blood lymphocytes for biological dosimetry*, establece los criterios estándar para los laboratorios que realizan dosimetría biológica mediante la técnica de micronúcleos.

En la actualidad se encuentra en fase de desarrollo la Norma ISO/CD 20046 *Radiological protection - Performance criteria for laboratories using fluorescence in situ hybridization (FISH) translocation assay for assessment of overexposure to ionizing radiation*, específica para el análisis de translocaciones mediante la técnica FISH.

Como todos estos estándares han sido desarrollados recientemente, no en todos los países es posible su acreditación por el organismo nacional compe-

tente, por ello se suele utilizar la Norma ISO 17025-2005 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* para obtener la acreditación, ya que se puede incluir en el alcance de la misma el estándar específico de dosimetría biológica que se utilice.

Requisitos aplicables a los centros de atención de nivel II

Como se ha indicado anteriormente, los laboratorios de DB constituyen una herramienta de apoyo en caso de emergencia y pueden estar relacionados con los Centros de atención de nivel II. Por ello, se ha considerado procedente introducir en este informe la información relacionada con el marco legal que afecta a estos centros.

Los tipos y características de los servicios de asistencia a los lesionados y contaminados por isótopos radiactivos y radiaciones ionizantes están definidos en la *Resolución de la Dirección General de Asistencia Sanitaria por la que se dictan normas para el desarrollo y aplicación de la Orden de 5 de diciembre de 1979 sobre organización de servicios de asistencia a lesionados y contaminados por elementos radiactivos y radiaciones ionizantes*.

De acuerdo con lo establecido en la legislación, estos servicios deben estar autorizados por las autoridades sanitarias de sus respectivas Comunidades Autónomas e incluidos en el Registro General de centros, servicios y establecimientos sanitarios gestionado por el Ministerio de Sanidad Servicios Sociales e Igualdad (MSSSI) (artículo 46 RPSRI y artículos 15.2 y 40.9 de la Ley 14/1986 de 25 de abril General de Sanidad).

En el Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN), en el anexo VI “Medios materiales y recursos”, se especifica dentro de los medios materiales y recursos específicos responsabilidad de las autoridades sanitarias la disponibilidad de un centro médico especializado y

acreditado para tratamiento a irradiados y contaminados y la disponibilidad de laboratorios de diagnóstico y dosimetría biológica.

El Hospital General Universitario Gregorio Marañón (HGUGM) cumple con todos los requisitos establecidos por la ley española para ser un centro de atención de nivel II. El Hospital La Fe de Valencia dispone de la autorización de la Comunidad Autónoma de Valencia, y ha solicitado su inscripción en el Registro del MSSSI.

Tanto el hospital HGUGM (año 2011) como el de La Fe de Valencia (año 2015) pertenecen a la red REMPAN (The Radiation Emergency Medical Preparedness and Assistance Network) de la Organización Mundial de la Salud.

La finalidad de esta red es, entre otras cosas, proporcionar asistencia médica en casos de irradiación. Algunos centros REMPAN también llevan a cabo investigación relacionada con diversos aspectos relacionados con los efectos biológicos de las radiaciones, tratamientos médicos, epidemiología, etc.

Situación actual en España

El Centro de Radiopatología del Servicio de Oncología Radioterápica del HGUGM es el único centro de nivel II, de referencia nacional, para la atención a irradiados y/o contaminados por sustancias radiactivas desde 1983, autorizado por el entonces Ministerio de Sanidad y Consumo.

El laboratorio de DB adscrito a dicho Centro desde 1989, es el único laboratorio español acreditado por la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 con alcance a la norma ISO 19238/14 para la realización de ensayos de dicéntricos con fines biodosimétricos, y es el encargado de dichos estudios ante cualquier sospecha de exposición accidental dentro del territorio nacional, labor que lleva realizando desde su creación en 1989.

Por todo ello, es considerado como centro nacional de referencia tanto para la evaluación de personas expuestas a radiaciones ionizantes de forma accidental como para prestar asistencia sanitaria a personas irradiadas o contaminadas por elementos radiactivos y está incluido en los planes de emergencia de todas las provincias españolas con centrales nucleares.

El CSN ha establecido con el HGUGM los siguientes acuerdos:

- Acuerdo de colaboración entre la Fundación para la Investigación Biomédica del Hospital Gregorio Marañón y el Consejo de Seguridad Nuclear, en dosimetría biológica para la evaluación de personas expuestas a radiaciones ionizantes de forma accidental y en emergencias radiológicas y nucleares, por parte del Laboratorio dosimetría biológica del Servicio de Oncología Radioterápica del HGUGM.

- Acuerdo de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Fundación para la Investigación Biomédica del Hospital Gregorio Marañón en el campo de la dosimetría biológica en el ámbito de la I+D.

En España hay otras entidades que disponen de un laboratorio de DB, como por ejemplo, el Hospital La Fe de Valencia, la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), la Universidad de Sevilla, la Universidad de Murcia, el Instituto de Investigación Biomédica A Coruña y el Centro Oncológico de Galicia.

Estos laboratorios desarrollan su actividad en el ámbito sanitario o en el de la investigación si bien, actualmente, ninguno de ellos dispone de acreditación ENAC para la realización de ensayos de dosimetría biológica.

Tanto el laboratorio de la UAB como el del Hospital de la Fe de Valencia, al igual que el perteneciente al HGUGM, han formado parte de las redes europeas e internacionales de laboratorios de DB y han participado en ejercicios de

intercomparación (estimación de dosis mediante DB-ensayo de dicéntricos).

Laboratorios en redes

En situaciones accidentales que afectan a colectivos de personas, la DB se utiliza en las fases iniciales para facilitar la clasificación de las personas en base a la dosis recibida. Debido a la laboriosidad de la técnica y a la complejidad de su aplicación en estimaciones dosimétricas, en situaciones de emergencias que afectasen a un elevado número de personas, la capacidad del laboratorio de referencia nacional podría no ser suficiente, por lo que desde hace unos años se han establecido redes nacionales e internacionales de colaboración.

Algunos laboratorios de referencia nacionales han establecido redes nacionales e internacionales para aumentar sus capacidades. Por otra parte, algunas organizaciones (OIEA, OMS) que cooperan a escala internacional también han establecido redes de biodosimetría.

El establecimiento de redes, tanto nacionales como internacionales, exige que se coordine la infraestructura logística, el manejo de los datos y las comunicaciones. Esas redes también ofrecen una excelente plataforma para realizar ejercicios y estudios comparativos que aseguren un desempeño adecuado de los distintos laboratorios.

A continuación se incluye información de las principales redes de DB:

-Red BioDoseNet (Global biodosimetry laboratories network for radiation emergencies): promovida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), dentro de la red REMPAN (*Radiation Emergency Medical Preparedness and Assistance Network*). Es una red mundial de laboratorios de dosimetría biológica cuyo papel es apoyar la gestión y la toma de decisiones en casos de grandes eventos de emergencia de radiación. En preparación para este tipo de eventos, Bio-



El Centro de Radiopatología del Servicio de Oncología Radioterápica del HGUGM, es el único centro de nivel II, de referencia nacional, para la atención a contaminados por sustancias radiactivas.

DoseNet se centra en la armonización de las metodologías estudio de la capacidad de respuesta, el intercambio de conocimientos y la realización de ejercicios de intercomparación.

En la actualidad participan en esta red el HGUGM y el Hospital de La Fe de Valencia.

-Red RANET (Radiation Assistance Network). Se creó por el OIEA en el marco del Convención de asistencia. Es una red de asistencia internacional, a petición de un estado, en caso de un incidente o emergencia nuclear o radiológica. No es específica de dosimetría biológica.

-Red LBDNET (Red Latinoamericana de Dosimetría Biológica). La LBDNet fue fundada oficialmente en el año 2007, en el marco del Proyecto de cooperación técnica del OIEA RLA9054 denominado “Fortalecimiento de los sistemas nacionales para la preparación y la respuesta ante emergencia radiológicas y nucleares”.

Su Misión es proveer, asistencia temprana en dosimetría biológica, en caso de emergencia radiológica en la región de América Latina. Para ello, se ha fijado como objetivos fortalecer las capacidades de

los laboratorios de DB existentes en la región, proveer asistencia a los países de la región carentes de laboratorio de dosimetría biológica y trabajar de manera coordinada con otras redes internacionales

La LBDNET apoya los ejercicios de intercomparación para mantener los estándares de calidad en DB, preparando y enviando muestras de sangre procesada para su análisis citogenético y/o compartiendo y discutiendo resultados obtenidos por cualquier laboratorio de la Red.

La integración de la Red está basada en una participación voluntaria y consensuada de laboratorios calificados en DB. La representación de los laboratorios es institucional y no personal. En la actualidad forman parte de esta red laboratorios de Argentina, Brasil, Chile, Cuba, México, Perú y Uruguay.

-Red RENEB “Realizing the European Network of Biodosimetry”. Promovida por la Unión Europea. del. El proyecto RENEB, financiado dentro del 7º Programa Marco de Fisión EURATOM de la Unión Europea (enero-2012/diciembre 2015) y coordinado por el Bundesamt für Strahlenschutz (organismo regulador alemán). En él participaron 23 laborato-

rios de 17 países expertos en dosimetría biológica, 3 de ellos españoles (HGUGM, Hospital de La Fe de Valencia y UAB).

Dentro de este proyecto se realizaron trabajos de comparación y armonización de las técnicas utilizadas en DB, identificación de nuevos ensayos, actividades de formación y ejercicios de intercomparación.

Una vez finalizado el proyecto, los participantes en el mismo han previsto la firma de un “*Memorandum of Understanding*” a fin de garantizar que esta red se mantenga activa.

En el documento “*Realizing the European Network of Biodosimetry*” (RENEB). *Strategic Research Agenda (noviembre de 2015)*”, se considera que el mantener en activo la red RENEb, tendría un impacto positivo tanto en los sistemas de preparación y respuesta en emergencia, nacionales e internacionales, así como en el campo de la investigación relacionada con la DB, dentro de la comunidad europea.

-Redes nacionales:

Existen redes nacionales (por ejemplo, en Francia, Corea, Japón o Canadá) que han establecido acuerdos, que permiten que la competencia técnica existente en el país en DB, se pueda movilizar rápi-

damente bajo la dirección del laboratorio nacional de referencia.

En España, en el seno de la Plataforma Nacional de I+D en Protección Radiológica (PEPRI), ha surgido la iniciativa de creación de la Red Española de Dosimetría Biológica (REDB) que reuniría a seis laboratorios españoles con experiencia en DB.

A criterio del CSN, y de acuerdo con las consideraciones reflejadas en el apartado 4.2 *Requisitos aplicables a un laboratorio de DB* así como con la sistemática seguida en otros países, en caso de emergencia se activaría el laboratorio nacional de referencia (en este caso el HGUGM) que sería quien, en caso necesario coordinaría la participación con otros laboratorios o, en caso de estar constituida, con la REDB

Proyectos de I+D

El CSN, consciente de la importancia de la DB en la estimación de las dosis en caso de incidente y de su importancia como herramienta de apoyo en la respuesta a emergencias, viene desde hace años apoyando a través de su Plan de I+D proyectos de investigación encaminados al desarrollo y mejora de las técnicas y metodologías aplicadas en este campo. Esto ha permitido

disponer en la actualidad de la necesaria estructura a nivel nacional.

El Plan de I+D del CSN 2016-2020, aprobado por el Pleno en su reunión del 29 de junio de 2016, incluye la línea estratégica de investigación de radiobiología. Dentro de la misma tendrían cabida los proyectos relacionados con las mejoras en DB, siempre y cuando estos proyectos estén encaminados a cubrir las necesidades del CSN como regulador, tal y como se establece en el apartado 2. *Objetivos de las actividades de I+D del CSN* del citado Plan de I+D.

Consideraciones finales

La finalidad de la dosimetría biológica es servir de apoyo a la dosimetría física (ej. confirmación de si las dosis registradas habrían sido recibidas realmente por el trabajador expuesto), estimar las dosis en caso de situaciones en las que podría haberse producido exposición a las radiaciones y no se dispone de dosimetría física, como por ejemplo en los casos de incidente o emergencia nuclear o radiológica.

La DB se utiliza desde mediados del año 1960 para la estimación de las dosis en los casos en los que no se dispone de dosimetría física y está fuertemente ligada a los programas de protección radiológica y a la evaluación de dosis en los casos de accidente o emergencia nuclear o radiológica. Es por ello que, tanto a nivel nacional como internacional, su desarrollo está ligado con los organismos u organizaciones con competencia o implicados en estas materias.

Los laboratorios de DB no cumplen las características para ser considerados como SDP, dado que:

- Las técnicas utilizadas carecen de la fiabilidad necesaria para ser utilizada como dosimetría en condiciones normales de operación (factores de confusión, umbrales de detección, etc.).

- La finalidad de los laboratorios de dosimetría biológica, es la estimación de dosis reci-



Algunos laboratorios de referencia han establecido redes para aumentar sus capacidades.

bidas por personas potencialmente afectadas por un incidente o accidente radiológico y no disponen de dosimetría física.

-El anterior criterio es coherente con lo aplicado en los países de nuestro entorno. No hay constancia de que los laboratorios de DB sean considerados a nivel internacional como SDP. La tendencia en otros países es que estos laboratorios se acrediten en base a los estándares específicos para dosimetría biológica publicados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) o bien que garanticen la calidad de sus resultados mediante la participación en ejercicios de intercomparación.

El Hospital General Universitario Gregorio Marañón (HGUGM) es considerado en la actualidad como centro nacional de referencia tanto para la evaluación de personas expuestas a radiaciones ionizantes de forma accidental como para prestar asistencia sanitaria a personas irradiadas o contaminadas por elementos radiactivos.

Esto es debido a que el Centro de Radiopatología del Servicio de Oncología Radioterápica de este hospital, cumple con los requisitos establecidos por la ley para ser un Centro de atención de nivel II y, por otra parte, el laboratorio de DB adscrito a dicho Centro es el único laboratorio español acreditado por ENAC para la realización de dosimetría biológica (ensayo de dicéntricos).

En España hay otras entidades que disponen de un laboratorio de DB, como por ejemplo, el Hospital La Fe de Valencia, la

Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), la Universidad de Sevilla, la Universidad de Murcia, el Instituto de Investigación Biomédica A Coruña y el Centro Oncológico de Galicia.

Estos laboratorios desarrollan su actividad en el ámbito sanitario o en el de la investigación si bien a esta fecha ninguno de ellos dispone de acreditación ENAC para la realización de ensayos de dosimetría biológica.

Tanto el laboratorio de la UAB como el del Hospital de la Fe de Valencia, al igual que el perteneciente al HGUGM, han formado parte de las redes europeas e inter-

En España se pondrá en marcha la Red Española de Dosimetría Biológica (REDB), que reunirá a seis laboratorios españoles con experiencia en DB

nacionales de laboratorios de DB y han participado en ejercicios de intercomparación (estimación de dosis mediante DB-ensayo de dicéntricos)

En situaciones de emergencias que afectasen a un elevado número de personas y que pudieran dar lugar a que la capacidad del laboratorio de DB del HGUGM se viera superada, sería esta entidad quien valoraría la necesidad de solicitar el apoyo de otros laboratorios nacionales de DB o

bien de la Red Española de Dosimetría Biológica-REDB (en caso de estar constituida) y quien coordinaría todos los aspectos relacionados con su participación.

En situaciones accidentales que afectan a colectivos de personas, la capacidad del laboratorio de referencia nacional se podría ver fácilmente superada, por lo que desde hace unos años se han establecido redes nacionales e internacionales de colaboración.

Las principales redes de laboratorios de dosimetría biológica están auspiciadas por organizaciones internacionales como el OIEA, la OMS o la UE. Además de proporcionar el apoyo necesario en el caso de una emergencia que pudiera superar la capacidad de laboratorio nacional de referencia, estas redes ofrecen una excelente plataforma para realizar ejercicios y estudios comparativos que aseguren un desempeño adecuado y la calidad en los resultados de los distintos laboratorios.

Finalmente, en España, en el seno de la Plataforma de Nacional de I+D en Protección Radiológica (PEPRI), ha surgido la iniciativa de creación de la Red Española de Dosimetría Biológica (REDB), que reunirá a seis laboratorios españoles con experiencia en DB. En el caso del Consejo de Seguridad Nuclear, el apoyo a prestar a un proyecto de I+D en el campo de la DB estaría condicionado, al igual que cualquier otro proyecto de I+D, a que el mismo esté encaminado a cubrir las necesidades del CSN como regulador, tal y como se establece en el apartado 2. *Objetivos de las actividades de I+D del CSN del Plan de I+D 2016-2020.*

¹ Ver "Resolución de la Dirección General de Asistencia Sanitaria por la que se dictan normas para el desarrollo y aplicación de la Orden de 5 de diciembre de 1979 sobre organización de servicios de asistencia a lesionados y contaminados por elementos radiactivos y radiaciones ionizantes".

² A fecha 17 de septiembre de 2013, 68 países son firmantes de la Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica, que dispone de 111 Estados Parte. Por su parte, el Convenio sobre la pronta notificación de accidentes nucleares dispone, a fecha 17 de septiembre de 2013, de 117 Partes Contratantes y 69 firmantes.

³ Ver la Norma de Seguridad del OIEA N° GS-G-2-1 Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas.

⁴ Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, por el que se aprueba el Plan Básico de Emergencia Nuclear.

⁵ Esta red se creó en 1987 en el seno de la OMS, a través de la OIEA y reúne alrededor de 40 instituciones médicas o de investigación especializadas en diagnóstico, tratamiento y seguimiento a largo plazo de las personas sobreexpuestas a radiación ionizante.



Conocidos como reactores modulares pequeños (SMR), en todo el mundo hay cerca de 50 prototipos en distintas fases de producción y desarrollo.

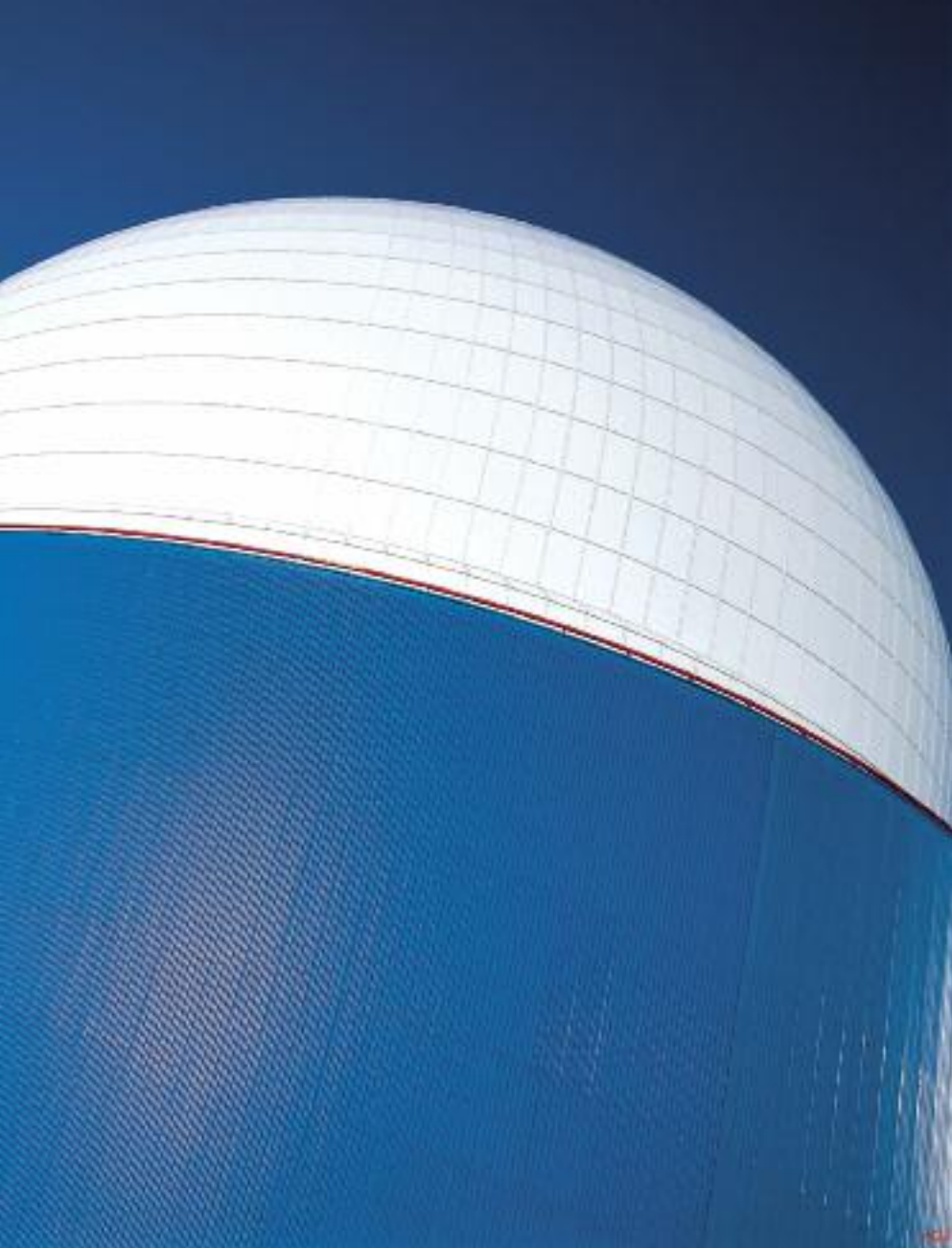
Los reactores modulares pequeños buscan producir energía más segura y más barata

La revolución de la energía nuclear a pequeña escala

Aparte de su interés científico y comercial, la modularidad va a permitir que los reactores nucleares de pequeño tamaño SMR apuesten por el camino de la versatilidad y puedan convivir, completar y, a veces, sustituir a las centrales nucleares convencionales que hayan completado

su ciclo de operatividad. Con la ventaja añadida de ser más seguros, pueden convertirse en un sistema complementario de producción de electricidad a costes competitivos.

■ Texto **Roger Corcho** | Divulgador científico | ■



La tendencia es lenta pero inexorable: el futuro es eléctrico. La industria del automóvil es uno de los claros ejemplos de este viraje hacia la electricidad con el que se pretenden moldear los sueños del progreso. La producción de energía eléctrica no puede perder el paso de la innovación, y desde el campo de la energía nuclear, el reactor modular pequeño SMR (Small Nuclear Reactors, por sus siglas en inglés) es una de las propuestas que atrae un mayor interés científico y comercial.

Los grandes reactores son capaces de producir más electricidad a un coste menor. Como el tamaño es un factor decisivo

para incrementar la eficiencia de las centrales, se han construido reactores cada vez más grandes y con una potencia mayor, hasta alcanzar actualmente los 1.600 megavatios. Tomar este camino ha permitido que la electricidad de origen nuclear siga siendo la más barata (en Europa cuesta 67 euros el megavatio) en comparación con el resto de fuentes energéticas: las plantas térmicas de carbón producen electricidad a 90 euros, mientras que la de origen eólico asciende hasta los 134 euros por megavatio. La energía nuclear, además, produce electricidad sin generar emisiones que contribuyan a la contaminación medioambiental.

Pero, para la construcción de grandes reactores es necesario salvar algunas complicaciones. Para empezar, si los reactores son de gran tamaño, es necesario construirlos en el mismo sitio en el que se ubicará la central. Es un proceso casi artesanal –como si en la fabricación de automóviles no se hubiera introducido aún la cadena de montaje–, que eleva drásticamente su precio hasta convertir cada planta nuclear en una enorme inversión. En segundo lugar, los núcleos de estos grandes reactores pueden llegar a fusionarse, y hay que adoptar numerosas medidas de seguridad para impedir que se produzca una catástrofe. Conseguir unas centrales totalmente seguras tiene un coste que hay que sumar a la ya de por sí abultada inversión inicial. La construcción de una central puede llegar a costar en la actualidad más de 4.000 millones de euros.

Reducir el tamaño

Dado que el principal problema de las centrales nucleares es su tamaño, ¿por qué no optar por hacerlas más pequeñas? Ya en la década de 1950 se construyeron reactores pequeños que desarrollaban una potencia considerable, que se usaron para propulsar submarinos, portaviones o rompehielos. Aunque permitían salvar grandes distancias sin necesidad de repostar –han sido especialmente útiles para navegar por zonas de difícil acceso–, no se consiguió que fueran rentables, por lo que solo en casos aislados la navegación marítima ha seguido recurriendo a esta forma de energética de propulsión.

Una de las ventajas de trabajar con reactores pequeños –de 300 megavatios o menos– es que su núcleo no corre riesgo de fusionarse y desaparece, por tanto, la posibilidad de accidentes graves. Además, podrían fabricarse en serie, con el consiguiente descenso de los precios de producción y la reducción en

los tiempos de construcción y montaje. El resultado final de los montajes seridos arroja además una calidad muy superior y con menos fallos. Una vez puestas en marcha las instalaciones para fabricar reactores, la caída de los precios sería aún más considerable por la economía de escala. Al ser unidades manejables, pueden transportarse hasta el lugar en el que se vayan a instalar, podrían ubicarse en zonas remotas y especialmente interesante –y barato– sería aprovechar las infraestructuras de centrales térmicas de carbón abandonadas.

El inconveniente es que producen menos electricidad y ésta es mucho más cara. En este balance de pros y contras, durante años parecía que el hermano pequeño de los reactores era una alternativa que nadie quería plantear en serio. La situación, sin embargo, ha cambiado al añadir la característica de la modulari-

dad. Tal y como ocurre con las baterías –en las que la potencia se incrementa al conectar celdas diferentes–, los reactores pequeños también pueden acoplarse con el fin de que conjuntamente produzcan una potencia eléctrica mayor. Esto permite una gran capacidad de adaptación, ya sea para cubrir la demanda eléctrica al conectarse a una red pequeña, o bien acoplar varios reactores para conseguir potencias cercanas a las grandes plantas nucleares para abastecer de electricidad a una ciudad o región.

Mercado y competitividad

Pero, cualquier gran proyecto sobre nuevas fuentes de energía es arriesgado. Sin el apoyo de los estados, quedan escasas opciones para abrirse hueco en el mercado y ser competitivos en relación con las fuentes de energía ya consolidadas. Las subvenciones parecen imprescindibles

para que el desarrollo de esta tecnología madure y despliegue todo su potencial. Ocurre en el caso de las energías renovables, también con una tecnología novedosa como lo es la de los de baja y media potencia. En este caso, gobiernos como el estadounidense o más recientemente el británico –entre otros países como Rusia o China– han mostrado interés en estos nuevos reactores, lo que ha atraído además capital privado. Con una red financiera sólida que financie su desarrollo tecnológico, las perspectivas serían claramente más que favorables.

En el estado de Oregón (EE.UU) se encuentra NuScale Power, una empresa que tiene todos los números para ser la primera en construir reactores modulares en Estados Unidos. Se trata de unos reactores por agua a presión (PWR por sus siglas en inglés), que es el sistema más extendido en la actualidad. Miden

SMALL MODULAR REACTORS (SMR)

Cómo funciona un SMR



El factor diseño

- 1 La mayoría de sus componentes (módulos) se montan en fábrica y se trasladan en tren o camiones al punto de uso, donde se instalan y cargan con combustible.
- 2 Los reactores pueden instalarse bajo tierra, proporcionando mayor seguridad y protección.
- 3 Permite instalar SMRs adicionales en el mismo espacio, según aumente la demanda de energía.

Flexibilidad

Los reactores SMR podrían aumentar las opciones de la tecnología nuclear. Su tamaño más pequeño los hace ideales para ubicaciones que no pueden soportar grandes reactores.

Los reactores SMR son lo último en innovación tecnológica en el campo de la energía nuclear. Con un tamaño tres veces menor que las centrales medias, la simplificación y el diseño compacto buscan disminuir los costes.

23 metros de altura (como un edificio de nueve pisos) por 4,5 metros de lado, y proporcionan una potencia de 50 megavatios. Aunque calificarlos de pequeños podría parecer gratuito, este calificativo está justificado porque hay camiones capaces de acarrear estas moles. Si se instalan bajo tierra, se logra una mayor protección ante una catástrofe natural, y dejan de estar expuestos a un ataque terrorista. Funcionan con uranio 235 enriquecido y se calcula que podrían estar en funcionamiento dentro de entre 15 y 30 años. En ese momento habría que sustituir los elementos combustibles, que son unas vainas que contienen las pastillas de uranio, y que se distribuyen formando una rejilla cuadrada.

En su diseño, obra de José Reyes, director técnico de la empresa, se ha optado por la sencillez y la seguridad, como decantarse por la convección para que circule el agua (con lo que se evitan los sistemas eléctricos para bombear el agua que fallaron, por ejemplo, en Fukushima). Se incorporarán automatismos para reducir riesgos y sistemas de seguridad pasivos para neutralizar la exposición de los técnicos. Cuando se empiecen a fabricar suficientes unidades, se espera que el precio se ajuste aún más. Este no es un asunto menor: como la electricidad producida por estos reactores es más cara, si los gastos fijos no se reducen de forma significativa, las cuentas no llegaran a cuadrar en las compañías promotoras de su construcción.

El proyecto fue aprobado a principios de 2017, y la primera central se empezará a construir en Idaho. Será una central formada por 12 reactores y proporcionará cerca de 600 megavatios de potencia –lo que cubre las necesidades de medio millón de hogares–, mientras que



Mayor control

Desde el desastre nuclear de Fukushima en 2011, la seguridad se ha convertido en una preocupación fundamental. La amenaza potencial de una contención ineficaz, ya sea causada por una mala construcción, desastres naturales inesperados o ataques terroristas, se reduce en gran medida con los reactores SMR. Y es que están diseñados para resistir la actividad sísmica mediante la utilización de una piscina subterránea de agua que reduce los temblores causados por los terremotos, limitando en gran medida la amenaza de una catástrofe nuclear. Esta contención subterránea protegerá de manera más eficaz ante la eventualidad de un desastre natural.

Sin embargo, a pesar de elegir el lugar adecuado mediante una exhaustiva evaluación de las condiciones geológicas, hidrológicas y sísmicas, el riesgo de la amenaza del terrorismo sigue presente, y los reactores nucleares presentan un blanco fácil. Pero, la elección de un emplazamiento subterráneo, sumado a un blindaje de hormigón interior que cubra los requisitos legales de protección, formarían un escudo contra el ataque de bombas o accidentes aéreos. Añadiéndose a esto las propiedades de absorción de impacto de la piscina de agua que rodearía los SMR, las consecuencias de esas características se reducirían significativamente. ▶

la inversión requerida no alcanzará los 3.000 millones de dólares: a pesar de ser la primera en construirse, se habrá logrado un ahorro significativo en comparación con el coste de una central convencional. Gracias a su versatilidad, estos reactores –que se espera que entren en funcionamiento a finales de la década de 2020– podrán destinarse igualmente a la desalinización, a la producción de hidrógeno o para refinar petróleo. También

podrían usarse como apoyo a redes conectadas a plantas eólicas cuando el viento deje de soplar. Hay instituciones, como el ejército estadounidense, que también se han mostrado interesadas en adquirir estos prototipos, que les permitirán abastecerse de electricidad sin dependencias del entorno.

Hay otras propuestas, como el proyecto Superstar, impulsado por un equipo del Departamento de Energía de

Proyectos y tecnologías

En 2014 la empresa Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM) inició la construcción de cuatro reactores SMR que se caracterizarán por tener sus elementos primarios en el interior de la vasija. Otro proyecto avanzado es la planta nuclear flotante rusa Akademik Lomonosov. Usará dos reactores KLT-40S de agua presurizada de 35 megavatios. Su construcción se iniciará en Pevek (Rusia), en 2019. También destaca el K-300, un reactor de agua en ebullición que aún está en fase de diseño. En Europa, la Universidad Politécnica de Milán participa en un consorcio internacional para desarrollar el Reactor Internacional Innovador y Seguro (IRIS), que funcionará con agua presurizada y su capacidad será de 335 megavatios. En Francia, el constructor DNCS trabaja en el proyecto Flexblue, un reactor que se instalará en el fondo del mar (a 100 metros de profundidad), para finales de 2018. Estados Unidos cuenta con cuatro proyectos basados en reactores con agua presurizada en marcha: además de NuScale, se encuentra Westinghouse, el SMR-160, y Babcock & Wilcox's.

En muchos proyectos apuestan por emplear gas a alta temperatura como refrigerante porque son reactores más seguros y flexibles. En China, están construyendo un reactor de lecho de bolas (con grafito como moderador), y en Japón se está preparando un reactor HTR-PM que será capaz de generar 200 megavatios. ■



Los reactores SMS abren la posibilidad de que la energía nuclear pueda servir a mercados más pequeños, e incluso aplicaciones militares o industriales, complicadas para un reactor a gran escala.

Estados Unidos dirigido por el físico James Sienicki. El nombre del proyecto es un acrónimo formado con palabras como “sostenible”, “autónomo”, “seguro”, “transportable” o “resistente a la proliferación”. Su principal novedad es que usa plomo –no agua corriente, como ocurre en el caso de Oregón– como refrigerador, y también pone un gran énfasis en la seguridad: las barras de control que absorban neutrones y detengan la reacción en cadena se activarán de forma automática en caso de que se produzca algún problema.

Voces críticas

Pero no todos comparten el optimismo por esta tecnología. Hay voces críticas, como el *think tank* estadounidense del Instituto para la Energía y la Investigación Ambiental, que aseguran que será necesario desembolsar miles de millones de dólares en ayudas públicas para una tecnología con unas vulnerabilidades ya conocidas, y con el temor añadido de que

puedan acabar espolcando los programas de proliferación nuclear.

Aunque los SMR precisamente nacen para disipar estos miedos, lo cierto es que siguen existiendo lagunas sobre la inversión total que habrá que desembolsar, y también sobrevuela la incertidumbre en torno a la plena funcionalidad de los prototipos. Sin tener en cuenta tales interrogantes, las estimaciones más conservadoras aseguran que en 2035, el conjunto de reactores SMR instalados en el mundo proporcionarán hasta 75 gigavatios de potencia.

Ante tal perspectiva de negocio, hay muchas empresas –como Westinghouse o Holtec– que pretenden colocarse en una buena posición en un mercado cuya demanda podría multiplicarse en muy pocos años y en el que ningún país quiere quedarse atrás: en China, India, Sudáfrica o Canadá se está impulsando decididamente la construcción de SMR para una carrera que no ha hecho más que empezar. ●

Reacción en cadena

MEDIO AMBIENTE

La superficie forestal crece a un ritmo de 180.000 hectáreas por año en España

A pesar de los devastadores incendios de este último verano, la superficie forestal de España ha aumentado durante los últimos 25 años a un ritmo de 180.000 hectáreas por año, según el informe presentado en el Congreso de los Diputados por el colectivo Juntos por los Bosques, avalado por una treintena de entidades, entre las que figuran el Colegio de Ingenieros de Montes, Ingenieros Técnicos Forestales, la Sociedad Española de Ciencias Forestales o la Asociación Nacional de Empresas Forestales (ASEMFO).

Según este estudio, los bosques españoles han aumentado “de forma importante desde principios de siglo”, tanto por acción (repoblación forestal, forestación de tierras agrícolas) como por la expansión espontánea de los bosques como consecuencia del abandono rural. Actualmente, los bosques ocupan unos 27 millones de hectáreas, que “generan empleo, desarrollo rural y cohesión territorial”, además de desempeñar un papel “crucial” para hacer frente al cambio climático.



Los bosques ocupan, en la actualidad, unos 27 millones de hectáreas en nuestro país.

LIBROS

El bosón de Higgs no te va a hacer la cama Javier Santaolalla

La esfera de los libros. Madrid, 2016. 376 páginas

Viajes en el tiempo, agujeros negros, motores de antimateria, aceleración del universo... La física moderna sueña a película, pero es ciencia, de la de verdad verdadera, la que nos cuenta una historia fascinante de descubrimientos y sueños cumplidos, de luchas y disputas, de pasión por comprender la naturaleza.

Este divertido libro te ayudará a entender de una vez por todas lo que nos rodea, desde lo más pequeño a lo más grande, y a saber que el bosón de Higgs no te va a hacer la cama, ¡ni aunque le insistas!



INVESTIGACIÓN

XFEL, la fuente de rayos X más grande del mundo

La mayor y más potente fuente de rayos X está en Europa y acaba de ser instalada en Hamburgo (República Federal de Alemania) y permitirá analizar la materia a escala



atómica a escala atómica como nunca hasta ahora se había hecho. El XFEL descifrá la composición molecular de virus o células, captará imágenes tridimensionales del mundo nanológico de reacciones químicas y estudiar fenómenos dentro y fuera de nuestro planeta. Y es que su brillo será mil millones de veces mayor que el de los sincrotrones, las mejores fuentes de rayos X convencionales.

IN MEMORIAM

Luis Gutiérrez Jodra, pionero de la investigación nuclear

El químico madrileño y experto en energía nuclear Luis Gutiérrez Jodra ha fallecido a los 94 años. Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid desde 1945, fue uno de los pioneros en España de la investigación nuclear y de sus aplicaciones industriales, así como un defensor del desarrollo de este tipo de energía. De hecho, dirigió más de 40 tesis doctorales sobre energía nuclear, publicó más de 200 trabajos de investigación y pronunció por encima de mil conferencias sobre esta materia en los cinco continentes al tiempo que realizaba investigaciones para empresas químicas españolas.

Químico y profesor

La carrera de Química la simultaneó con la de Magisterio, si bien inclinó su vocación por la Química Técnica e hizo el doctorado en Química Industrial también por la Universidad Complutense de Madrid, donde leyó su tesis obteniendo el Premio Extraordinario en 1949.

En 1958 pasó a ocupar la cátedra de Física y Química de los Procesos Industriales en la Facultad de Ciencias de la Complutense, y recién doctorado en Química Industrial formó parte del grupo que inició las investigaciones nucleares en nuestro país.



Luis Gutiérrez Jodra fue miembro del CSN hasta 1987.

Al margen de su actividad docente, Gutiérrez Jodra desempeñó importantes y múltiples actividades dentro del terreno profesional: en 1949 ingresó en la Junta de Energía Nuclear, donde pasó por diferentes puestos y se convirtió en asesor desde 1976.

Supervisor científico de la ONU

En 1956 fue designado supervisor científico en Naciones Unidas y dos años después fue nombrado consejero de Eurochemic, sociedad europea de la OCDE que, con sede en Bélgica, se dedica al tratamiento de combustibles irradiados. En esta empresa fue miembro de su Comité Técnico (1962-1968), vicepresidente (1964-1968) y presidente (1968-1971).

Miembro del Comité de Gestión de Residuos Radiactivos de la OCDE, Gutiérrez Jodra también fue miembro

del Comité Científico Asesor del Organismo Internacional de Energía Atómica, con sede en Viena.

Jubilado como miembro del Consejo de Seguridad Nuclear en 1987 y como catedrático de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense, desempeñó el cargo de director general del Forum Atómico Español. También fue académico de número de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la que fue su vicepresidente entre 2003 y 2013. Estaba en posesión de numerosas distinciones, entre ellas la Encomienda de número de la Orden de Isabel la Católica, que le fue concedida en 1961.

Católico de honda fe y con un gran sentido del humor, estaba profundamente orgulloso de su familia y como nos ha dicho su hija Alicia Gutiérrez-Jodra, “nuestro padre era un hombre de bien, íntegro y generoso. Tenía una curiosidad enorme y un afán de conocimiento que le hicieron tener una amplia cultura no solo científica, sino también de literatura, arte o historia. A su afán de superación y su gusto por las cosas bien hechas, se sumaba una falta total de pereza y una capacidad para disfrutar de todo, lo que para sus seis hijos ha sido todo un ejemplo. Se ha ido después de una vida larga y plena. Descanse en paz”.

El CSN participa en la 61ª Conferencia de la OIEA

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) participó en la 61ª Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que se celebró en Viena (Austria) entre el 18 y el 22 de septiembre. La delegación del CSN estuvo encabezada por su presidente, Fernando Marti Scharfhausen, y de ella formaron parte la vicepresidenta, Rosario Velasco, y el consejero Fernando Castelló.

En la sesión de apertura de la Conferencia, el director general del OIEA, Yukiya Amano, informó sobre el trabajo y los logros del organismo desde la última Conferencia General y detalló los grandes hitos de la Agencia a lo largo de los años, al celebrar su 60 aniversario.

Este encuentro reunió a representantes de los Estados, organizaciones internacionales, ONG y medios de comunicación. La conferencia, de carácter anual, tiene como principales puntos de su agenda, la presentación del estado y de las mejoras a nivel internacional que refuerzan los programas de seguridad nuclear, de la protección radiológica, del transporte o de la gestión de los residuos, de las aplicaciones tecnológicas de este tipo de energía, la cooperación técnica, el refuerzo de los programas de la seguridad física nuclear y las mejoras en la eficiencia de los sistemas de salvaguardias para prevenir su utilización fuera de los usos previstos o el empleo malintencionado de los materiales y sustancias radiactivas.

Declaración de España

La declaración de España, redactada conjuntamente por el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (Maec), el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (Minetad) y el I Consejo de Seguridad Nuclear, se centró en la Seguridad Nuclear, la Protección Radiológica, la importancia de la cooperación internacional y la universalización de los Acuerdos de Salva-



La delegación estuvo encabezada por su presidente, Fernando Marti Scharfhausen, junto con la vicepresidenta, Rosario Velasco, y el consejero Fernando Castelló. En el centro, Yukiya Amano, de la OIEA.

guardias. Presentada por el embajador representante permanente de nuestro país ante la Oficina de las Naciones Unidas y los Organismos Internacionales en Viena, Gonzalo de Salazar, y está disponible en el apartado especial de la página web del OIEA dedicado al desarrollo de la Conferencia General.

Encuentro con Yukiya Amano

La delegación española mantuvo un encuentro con el Yukiya Amano, en el que se intercambiaron impresiones sobre la futura colaboración en protección radiológica en medicina en Latinoamérica a través del Colegio Oficial de Médicos, en cuya gestión ha participado el CSN, y la próxima misión IRRS-Artemis a España, que se celebrará el próximo año. Los representantes españoles felicitaron al director, quien en esta 61ª Conferencia General ha sido reeligido para los próximos cuatro años. Igualmente, agradecieron el apoyo que el máximo representante de este organismo

internacional ha mostrado al FORO Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.

Durante los días de la Conferencia General, la vicepresidenta Velasco participó en la sesión '*Ensuring quality and safety*', así como en la reunión plenaria de la red global GNSSN (*Global Nuclear Safety and Security Network*), con la presentación '*National Platform on Nuclear Energy*'.

El presidente del CSN participó en la reunión de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA, por sus siglas en inglés), en la que se abordaron asuntos relacionados con los reactores modulares pequeños, la capacitación reguladora, o la vida útil de las centrales nucleares y la gestión del envejecimiento.

Por su parte, el consejero Castelló participó en diversas reuniones con altos cargos del OIEA como miembro del Plenario del FORO Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.

Jornada informativa sobre la ley de Transparencia, acceso a la información pública y buen gobierno

El pasado 14 de septiembre se celebró en la sede del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) una sesión informativa dedicada a diferentes aspectos relacionados con la ley de transparencia, acceso a la información pública y buen gobierno, que inauguró la vicepresidenta del regulador nuclear, Rosario Velasco, con la participación del Consejo de Transparencia y Buen Gobierno (CTBG).

En su intervención, Velasco señaló que la entrada en vigor de la mencionada ley “coincidió con el inicio del proyecto de renovación de la web institucional del CSN y con su rediseño. Esto sirvió para reforzar nuestro compromiso con la transparencia al plantearnos cómo queríamos que fuese la nueva web”. “En este compromiso de mejora continua, estamos ya dando los siguientes pasos por ofrecer una mayor transparencia y así, estamos trabajando en la incorporación



La vicepresidenta del regulador nuclear explicó durante la sesión informativa los cambios y novedades de la web del CSN para adaptarse a la ley de transparencia

de una agenda institucional y otras iniciativas relacionadas con la publicidad voluntaria, que esperamos poder ofrecer a la sociedad en breve”, anunció.

El portal web del Consejo de Seguridad Nuclear cumpliendo con la Ley

19/2013, de 9 de diciembre, de transparencia, acceso a la información pública y buen gobierno, contiene la información incluida en el apartado de publicidad activa, que comprende información institucional y organizativa, de normativa y económica. ▶

El CSN, en la 4ª Conferencia Europea de Seguridad Nuclear

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), encabezada por su vicepresidenta, Rosario Velasco, participó en Bruselas en la *Nuclear Safety in Europe - Fourth Regulatory Regulatory Conference*, organizada por el Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG) durante los días 28 y 29 de junio. Esta edición de la conferencia bienal ha estado presidida por el director general del regulador nuclear finlandés (STUK), Petteri Tiippana.

Acompañando a la vicepresidenta del CSN asistieron el secretario general, Manuel Rodríguez, y el director técnico de



Seguridad Nuclear, Antonio Munuera, que intervino como ponente en una de las sesiones técnicas de la conferencia, desarrollada en cuatro sesiones técnicas. El CSN participó en el comité de organización encargado de la preparación y coor-

dinación de la conferencia y, además del organismo regulador español, colaboraron en la misma representantes de otras instituciones y entidades españolas (administraciones central y local, empresas eléctricas y representantes sindicales).

La Conferencia, que contó con unos 275 participantes procedentes de diversos ámbitos de la sociedad y del sector nuclear de todo el mundo, sirvió para poner de manifiesto la prioridad compartida de la seguridad nuclear, a cuya mejora continua contribuyen múltiples actores, y la importancia de la comunicación y la participación pública en su desarrollo. ▶



Reunión del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares

Una delegación del CSN, encabezada por el consejero Fernando Castelló, participó en la reunión anual del plenario del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO), que se celebró en Buenos Aires en julio.

De los asuntos tratados en esta reunión anual destacaron el debate y aprobación del documento de estrategia del FORO, cuya elaboración fue encargada a un grupo que estuvo liderado por el consejero Castelló. Los retos aprobados por el plenario para el próximo sexenio (2017-2022) se centran en fortalecer la cultura de seguridad en la región; lograr un crecimiento sostenible del FORO y consolidar su posicionamiento internacional; proporcionar soporte y asistencia a los miembros; promover la revisión y actualización de la función reguladora de los organismos miembros, con un enfoque hacia la armonización de prácticas; y la comunicación y transferencia de manera eficiente de los resultados de las actividades realizadas.

Comisiones mixtas de seguimiento

El consejero del CSN Javier Dies y la directora de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Neus Cónsul, presidieron la reunión de la Comisión de Seguimiento de la Cátedra Argos en Barcelona. Durante la reunión, celebrada el 8 de septiembre, su director, el profesor Lluís Batet, resumió las actividades realizadas y previstas en 2017, entre las que destacan la concesión de becas de doctorado, becas final de máster y becas de acceso al *Master of Nuclear Engineering* de la

UPC, así como la financiación para congresos y premio al mejor expediente académico de ingeniería nuclear de la ETSEIB-UPC.

Por otra parte, la vicepresidenta del CSN Rosario Velasco, y el director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (ETSIME) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), José Luis Parra, presidieron la reunión correspondiente a 2017 de la Comisión de Seguimiento de la Cátedra Juan Manuel Kindelán de formación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.



Reunión de la Comisión de Seguimiento de la Cátedra Argos.

Oferta de Empleo Público 2017: 8 plazas para nuevos funcionarios del cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN

El Consejo de Ministros aprobó el Real Decreto 702/2017, de 7 de julio, por el que se aprueba la oferta de empleo público para el presente año que contempla ocho nuevas plazas, acceso libre, para la Escala Superior del Cuer-

po de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear. La inclusión de nuevas plazas de funcionarios del cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN en la Oferta de Empleo Públi-

co, con una tasa de reposición correspondiente de sectores preferentes, ha sido una reivindicación permanente del actual Pleno.

De igual forma, es un eje prioritario de su política de recursos humanos, conscientes

de la complejidad y la variedad técnica de las actividades del organismo y de la necesidad de la gestión y transmisión del conocimiento a fin de la renovación de la plantilla del CSN y mantenimientos de las capacidades técnicas.

Principales acuerdos del Pleno

El CSN informa la propuesta de modificación de las órdenes ministeriales de las CN

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) acordó, en su reunión del 30 de mayo de 2017, con el voto en contra de la consejera Cristina Narbona, informar favorablemente las modificaciones propuestas por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (Minetad) a las órdenes ministeriales por las que se conceden las autorizaciones de explotación vigentes a las centrales nucleares en nuestro país.

El texto propuesto por el Minetad recoge todas las modificaciones aprobadas por el Pleno del CSN en su reunión del pasado 1 de febrero, e incorpora una modificación de carácter administrativo según la cual el plazo de presentación de una nueva solicitud de renovación de la autorización de explotación queda supeditada a la fecha de aprobación de un Plan Integral de Energía y Clima, debiendo ser presentada en la fecha establecida para presentar la Revisión Periódica de la Seguridad (RPS). Se mantiene la obligación de presentar, tres años antes de la expiración de la autorización, los documentos asociados a una eventual operación a largo plazo que se indican a continuación:

- Plan Integrado de Evaluación y Gestión del Envejecimiento (PIEGE)
- Suplemento del Estudio de Seguridad (ES)
- Revisión de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF)
- El estudio del impacto radiológico
- La revisión del plan de gestión de residuos radiactivos y combustible gastado

El BOE publica la Instrucción la IS-27 sobre criterios generales de diseño de centrales

El Boletín Oficial del Estado (BOE) del 3

de julio de 2017 publicó la revisión 1 de la Instrucción del Consejo IS-27, referente a criterios generales de diseño de centrales nucleares. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) aprobó la Instrucción del Consejo IS-27, referente a criterios generales de diseño de centrales nucleares. Esta Instrucción tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplirse en el diseño, fabricación, construcción, pruebas y funcionamiento general de las estructuras sistemas y componentes relacionados con la seguridad de una central nuclear. Además, es de aplicación a los titulares de las centrales nucleares españolas, en relación con sus autorizaciones de explotación.

En su elaboración se tuvo en cuenta la normativa de los países de origen de la tecnología de las centrales nucleares españolas, tanto de Estados Unidos como de Alemania, así como la del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Igualmente consideró la experiencia adquirida en relación con el diseño de estructuras, sistemas y componentes.

Hasta este momento, el Consejo de Seguridad Nuclear ha venido evaluando e inspeccionando el cumplimiento de los titulares de las centrales nucleares con esta normativa en todas las fases de la vida de las instalaciones.

Adicionalmente, en esta Instrucción se tuvo en cuenta el trabajo llevado a cabo en la Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental (WENRA, por sus siglas en inglés) con objeto de armonizar la reglamentación de los diferentes países.

Esta Instrucción del CSN tiene carácter vinculante, tal y como se establece en el artículo 2.a) de la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, de forma que su incumplimiento será sancionado según lo

dispuesto en el capítulo XIV (artículos 85 a 93) de la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre Energía Nuclear.

Modificación de diseño del sistema de venteo en la CN de Cofrentes

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en su reunión del pasado 26 de julio, estudió la solicitud del titular de la central nuclear de Cofrentes (Valencia) de aprobación de la propuesta de cambio del Plan de Emergencia Interior “Incorporación de la propuesta del párrafo en relación al condicionante para la puesta en marcha del sistema de venteo filtrado de la contención (SVFC). Mejoras en el apartado Medidas de Emergencia”.

El Pleno acordó informar favorablemente esta solicitud así como del informe que, como consecuencia de la evaluación realizada, efectuó previamente la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear.

Aprobación del Plan Estratégico 2017-2022

En su reunión del pasado 30 de mayo, el Pleno acordó aprobar, provisionalmente, el Plan Estratégico del CSN 2017-2022 y encargó a la Secretaría General que estableciese un procedimiento de consultas abierto a todo el personal del organismo regulador, así como a los representantes sindicales, tras lo cual, la Secretaría General elevaría nuevamente al Pleno para su aprobación definitiva el texto resultante. Los comentarios recibidos fueron valorados por el Comité del Sistema de Gestión y de la Seguridad de la Información, y determinó finalmente proponer al Pleno del CSN el texto resultante para su aprobación definitiva. El Pleno estudió la propuesta de la Secretaría General y acordó, por unanimidad, aprobarla en los términos presentados.



Datos actualizados que cuidan de nuestra salud

La web del CSN se presenta como una eficaz herramienta a la hora de contrastar la presencia de radiación gamma natural y de radón en nuestra geografía.

Así, el Mapa de radiación gamma natural en España (MARNA) es el resultado de un proyecto de I+D de colaboración entre el CSN y ENUSA que evalúa los niveles de radiación gamma natural en España. Satisface las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de la Unión Europea sobre la conveniencia de disponer de mapas de radiación natural para poder evaluar niveles de radiación y sus posibles incrementos respecto del fondo natural.

También se puede consultar en la web del CSN el Mapa del potencial de radón en España. Todos los edificios contienen radón en concentraciones habitualmente bajas. No obstante, existen zonas geográficas en las que, debido a su geología, es más probable encontrar edificios con niveles elevados.

La cartografía del potencial de radón en España, desarrollada por el Consejo de Seguridad Nuclear, categoriza las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón y, en particular, identifica aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales pre-

senta concentraciones superiores a 300 Bq/m³.

A partir del mapa del potencial de radón se obtiene, directamente, el mapa de zonas de actuación prioritaria (aquellas con potencial de radón superior a 300 Bq/m³). A efectos administrativos, es útil definir las zonas de actuación prioritaria a nivel municipal.

En este mapa se representan, en color destacado, los municipios en los que hay población que reside en zonas de actuación prioritaria. Se muestran en granate aquellos en los que esta población representa más del 75% de la total del municipio. 

Publicaciones

**Nuclear Safety
Council Report to the
Parliament**
Summary of 2016



**Informe del
Consejo
de Seguridad
Nuclear
al Congreso de los
Diputados y al
Senado**
Resumen del año 2016

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



**Programas de vigilancia
radiológica ambiental.
Resultados 2015**



**Código ético
del Consejo
de Seguridad
Nuclear**



**Política del
CSN sobre
cultura de
seguridad**



Guía de Seguridad 6.6
Guía para la elaboración de la
documentación de cumplimiento
de los requisitos reglamentarios de
los bultos de transporte de material
radiactivo no sujetos a aprobación.

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

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

06 A tunnel to defend the frontier of science

Deep below the El Tobazo massif, cocooned from the noise of the millions of particles that strike the Earth every second, several experiments are striving to unravel some of the greatest mysteries of the universe. The place is the Canfranc Underground Laboratory (LSC in Spanish), constructed taking advantage of a tunnel built in the 1920's to link Spain and France.

36 Albert Einstein: a paradoxical life

His continues to be one the most widely recognised names in the world, synonymous with genius for generations. The great paradox with Einstein is that he became world famous working in a field that was extremely difficult to understand for the vast majority of those who revered him. Behind the cliché of the absent-minded scientist were a complex personality and a life in which dark areas mixed with moments of great light.

44 Radiosurgery without a scalpel

Over the last half a century, robot-operated radiosurgery has become a useful alternative for the treatment of small tumours in the brain and other parts of the body. The Cyberknife, one of the most multipurpose and highly evolved systems, is a radiation-based treatment that is painless, accurate and efficient and with few side effects. It is available at a number of public and private hospitals in Spain and is applied at outpatients facilities.

58 The nuclear energy revolution writ small

Apart from their scientific and commercial interest, the modularity of small size nuclear reactors will allow them to tread the path of versatility, living alongside, complementing and at times replacing those conventional nuclear power plants whose operating cycle has come to an end. With the added advantage of being safer, they may become a complementary system for electricity generation at competitive costs.

RADIOGRAPHY

42 Fire protection at the Spanish nuclear power plants

INSIDE THE CSN

20 A sub-directorate with a simple name but multiple contents

Its name may lead us to imagine that we are simply dealing with the Nuclear Safety Council personnel in charge of protecting the environment against ionising radiations. Nothing would be further from the truth! The assistant director for Environmental Radiological Protection, Lucila Ramos, explains that it is in fact "a many-sided sub-directorate with a simple name but multiple and complex contents."

INTERVIEW

14 Interview with Ramón Gavela, director of the Centre for Energy-Related, Environmental and Technological Research (CIEMAT).

"The centre of gravity of Ciemat is technology development, very much in contact with businesses."

TECHNICAL ARTICLES

23 Towards a National Plan against radon in Spain

Radon is the second cause of lung cancer, after smoking, and is responsible for some 1,500 deaths a year in Spain. With a view to reducing the burden that exposure to this carcinogenic agent implies for the health of the population, European directive 2013/59/Euratom requires the Member States to set up national plans to combat the gas. The National Plan against radon must be implemented in Spain in 2018.

30 Modifications made at the Spanish nuclear power plants in the wake of the Fukushima accident

The Spanish regulatory framework requires nuclear power plant licensees to implement a programme for protection against fires in accordance with CSN Instruction IS-30.

50 Biological dosimetry, a fundamental tool in emergencies

This approach allows exposure to ionising radiations and their biological effects to be estimated.

- 63 Chain Reaction
- 64 Panorama
- 68 Plenary Agreements
- 69 csn.es
- 70 Publications



Nueva web del Consejo de Seguridad Nuclear, con mejores contenidos, mejor usabilidad y un diseño *responsive* que se adapta a todas las pantallas y terminales inteligentes.

Toda la información sobre seguridad nuclear y protección radiológica, de la mano del organismo regulador, ahora también desde tu móvil.



www.csn.es