



## Actividades de recarga en las centrales nucleares

Gabinete Técnico de la Presidencia del CSN



Más que la imagen y las relaciones del organismo regulador

Mariano Barbacid,  
investigador del cáncer:  
“Nos queda mucho  
que descubrir”

La gestión del  
conocimiento en el CSN  
y el proyecto RECOR

Rayos T, las ondas  
electromagnéticas  
del futuro más cercano



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](http://www.csn.es)

# La parada de recarga en las centrales nucleares españolas

En este nuevo número de ALFA contamos con dos importantes artículos técnicos; un extenso artículo sobre las actividades de recarga en las centrales nucleares donde se describe la secuencia de operaciones y actividades más significativas de una parada de recarga estándar así como un artículo dando a conocer la labor del área de Gestión del Conocimiento del CSN dedicada a identificar, gestionar y compartir los conocimientos de una organización y que, desde 2014, lo lleva a cabo a través del proyecto denominado RECOR.

Clausuramos nuestra sección 'EL CSN POR DENTRO' con el Gabinete Técnico de la Presidencia (GTP), una parte imprescindible dentro del organismo regulador donde las relaciones con el Pleno, las instituciones, los organismos internacionales o los medios de comunicación son la prioridad del gabinete y lo que hace de él la cara más visible del CSN.

Destacamos también dos artículos centrados en la innovación de la medicina nuclear en el tratamiento del cáncer y en la importancia de la inversión en este campo para seguir investigando y desarrollando nuevos proyectos; en el reportaje de medicina nuclear se nos presenta la importancia de la investigación, la inversión y el apoyo de la industria farmacéutica para

que la medicina nuclear y las radiaciones ionizantes salven vidas y se explica cómo el diagnóstico y el tratamiento de las patologías han cambiado la manera en la que nos enfrentamos al cáncer. Siguiendo en la línea de la investigación del cáncer, contamos con una interesante entrevista al bioquímico, Mariano Barbacid. Barbacid, ex-

*“Destacamos en este número de ‘Alfa’ una entrevista y un artículo enfocados en la innovación de la medicina nuclear en el cáncer y la importancia de la inversión en este campo”*

director del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), nos explica la importancia de la financiación en el ámbito de la investigación contra el cáncer desde el Laboratorio de Biología Celular y Molecular del Instituto Nacional del Cáncer en Bethesda, Washington.

Entre los artículos de divulgación encontramos también el de la radiación de terahercios, que en la próxima década puede aportar importantes innovaciones

en tecnologías de imagen médica, en las telecomunicaciones o los sistemas de control de calidad de nuevos materiales como el grafeno.

Además, en ALFA 38 hablamos sobre la creación de un material revolucionario, creado a partir de un patrón de la cestería japonesa. Se llama metal kagome y ha sido creado por físicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) y con este material se podrán fabricar dispositivos eléctricamente eficientes que podrían aplicarse al campo de la computación cuántica.

En nuestra sección 'CIENCIA CON NOMBRE PROPIO', nos centramos en una figura determinante en el mundo de la ciencia, Antoine Henri Becquerel. Becquerel, conocido como padre de la radiactividad, pero cuya carrera se extendió además por otros campos, se convirtió en una figura clave de la ciencia a partir de una conferencia junto con el matemático Poincaré, en enero de 1896, sobre una novedad difícil de creer: los rayos X.

En la 'RADIOGRAFÍA', explicamos un tema de actualidad, la gestión y clasificación de los residuos radiactivos de media y baja actividad en España, que comprende todas las actividades necesarias desde que se generan hasta que se almacenan de forma definitiva (gestión final).

## ALFA

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica  
Editada por el CSN  
Número 38 / Año 2018

**Comité Editorial**  
Fernando Martí Scharfhausen  
Antonio Munuera Bassols  
Fernanda Sánchez Ojanguren  
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 Rayos T: Ondas electromagnéticas que todo lo ven

La radiación de terahercios es uno de los pocos rangos del espectro electromagnético que no se estaba utilizando para aplicaciones prácticas. Esta situación está cambiando y se calcula que, en la próxima década, puede aportar importantes innovaciones en tecnologías de imagen médica, en las telecomunicaciones o los sistemas de control de calidad de nuevos materiales como el grafeno.

### 23 Metal Kagome, material exótico para la electrónica cuántica

La cestería japonesa y la mecánica cuántica tienen, desde ahora, en común un nombre y un patrón. Las cestas de kagome se fabrican con tiras de bambú tejidas con un patrón simétrico de triángulos entrelazados que comparten la esquina y son una de las tradiciones de la cultura japonesa. Este patrón ha generado la curiosidad de los científicos, planteando la hipótesis: es posible organizar los átomos de un metal u otra sustancia conductiva siguiendo sus enlaces y obtener un material con propiedades electrónicas cuánticas exóticas.



### 32 Henri Becquerel: La semilla del átomo

Una constante que se repite en la historia de la ciencia es la que sitúa la casualidad como elemento clave en la consecución de algunos descubrimientos. El hallazgo de la penicilina por Alexander Fleming sería el caso más conocido, pero el de la radiactividad por Henri Becquerel no le iría a la zaga. Estos casos parecerían señalar a algunos de los científicos más ilustres como individuos afortunados que un buen día se encontraron sobre su mesa de trabajo con la llave hacia la gloria y el premio Nobel. Una línea de pensamiento según la cual cualquiera de sus colegas podría haber llegado a los mismos resultados de haber sido agraciado con idéntico golpe de suerte.

### 40 Revolución permanente en la lucha contra el cáncer

El uso de isótopos radioactivos para el diagnóstico y tratamiento de patologías ha cambiado la forma en la que nos enfrentamos al cáncer. Hablamos de la medicina nuclear, un campo con décadas de historia que hoy trabaja para ser cada vez más efectiva e inocua. Buena prueba del éxito de la medicina nuclear está en su relevancia clínica actual: se calcula que una de cada dos personas se beneficiará de ella a lo largo de su vida.



## 38 RADIOGRAFÍA

Gestión y clasificación de los residuos radiactivos de baja y media actividad.

## EL CSN POR DENTRO

### 20 Gabinete Técnico de la presidencia (GTP): algo más que la imagen y las relaciones del CSN

Un organismo como el Consejo de Seguridad Nuclear, con la misión de mantener la seguridad nuclear y la protección radiológica en nuestro país, sabe la repercusión que tiene este tema. Además de la parte técnica, hay una importante labor que el Consejo realiza hacia el exterior. El Gabinete Técnico de la Presidencia (GTP) es el encargado de coordinar e impulsar diferentes estrategias, como potenciar los contactos institucionales, nacionales e internacionales y aportar solidez a la imagen del organismo, además de transparencia y credibilidad.

## ENTREVISTA

### 14 Mariano Barbacid, bioquímico, investigador del cáncer

“Lo que denominamos cáncer es un conjunto de enfermedades tan diversas o más que las enfermedades infecciosas”.

## ARTÍCULOS TÉCNICOS

### 27 Gestión del Conocimiento

La gestión del conocimiento se define como el enfoque integrado y sistemático encaminado a identificar, gestionar y compartir los conocimientos de una organización, y a posibilitar que grupos de personas creen colectivamente nuevos conocimientos para facilitar la consecución de los objetivos de la organización. Un tema que el CSN aborda desde 2014 con la puesta en marcha del proyecto denominado RECOR.

### 48 Secuencia de operaciones y actividades de recarga en las centrales nucleares

Las centrales nucleares necesitan paralizar periódicamente su producción de energía para extraer el combustible gastado a lo largo del ciclo e insertar elementos frescos que restablezcan la capacidad de funcionamiento a plena potencia durante un nuevo ciclo. Esta actividad se denomina ‘Parada de Recarga’ (*Refueling Outage*, en inglés) e involucra maniobras como el desmontaje de la vasija del reactor, que requieren el acceso a la contención y a otras zonas de habitabilidad normalmente restringida durante la operación normal.



61	Reacción en cadena
64	Panorama
68	Acuerdos de Pleno
69	csn.es
70	Publicaciones

Los astrónomos utilizan detectores de rayos T en la red de telescopios ALMA del desierto de Atacama (Chile), una de las mayores del mundo para explorar el cielo en busca de objetos del Universo temprano.



Esta radiación puede aportar innovaciones significativas en tecnologías de imagen médica y telecomunicaciones, en los próximos diez años

## Rayos T: Ondas electromagnéticas que todo lo ven

La radiación de terahercios es uno de los pocos rangos del espectro electromagnético que no se estaba utilizando para aplicaciones prácticas. En los últimos años, esa situación está cambiando y se calcula que en la próxima década puede

aportar importantes innovaciones en tecnologías de imagen médica, en las telecomunicaciones o los sistemas de control de calidad de nuevos materiales como el grafeno.

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

**H**asta hace poco más de 200 años, si alguien hubiese dicho que existía la luz invisible, habría sido tomado por loco. Sin embargo, en 1800, el astrónomo alemán William Herschel descubrió justo eso. Midiendo las distintas temperaturas de los colores que tomaba la radiación del Sol al pasar a través de un prisma, colocó un termómetro justo en el extremo del arcoiris, un poco más allá de la luz roja. Su propósito era medir la temperatura ambiente de la habitación, pero el resultado

del experimento fue mucho más impactante. La temperatura medida por el termómetro era superior a la de la luz visible y el científico concluyó que debía haber algún tipo de luz invisible que hacía subir el mercurio. Tras comprobaciones posteriores supo que había descubierto la radiación infrarroja. A partir de ese momento se fueron explorando las frecuencias del espectro electromagnético y, desde entonces, hemos encontrado muchas 'luces invisibles' con infinidad de utilidades, desde las

microondas con las que calentar la leche a los rayos X que permiten ver a través de la carne.

Una de las frecuencias menos utilizadas hasta ahora es la de los rayos T, que se encuentran en un espacio entre los infrarrojos descubiertos por Herschel y las microondas, en una banda que la Unión Internacional de Telecomunicaciones reserva entre los 0,3 y los 3 terahercios. Aunque como muchos otros tipos de radiación electromagnética, están por todas partes, hasta finales de los años 80 no



Los rayos T penetran capas finas de distintos materiales, como la ropa, el papel o una taza, pero se detienen ante tejidos más gruesos o incluso ante el agua líquida. Sin embargo, tienen una ventaja importante respecto a otros tipos de radiación como los rayos X: no es ionizante.

era sencillo detectarlos o producirlos. Desde la década de los 60 ya se habían generado imágenes con esta radiación en busca de señales muy lejanas, como las que deja el eco del *big bang* en el fondo cósmico, pero hasta hace menos de 30 años no empezaron a despertar el interés sobre su verdadero potencial en la vida diaria de las personas.

“Se utilizaba muy poco porque para generar los terahercios hacían falta unas máquinas grandísimas, carísimas y difíciles de manejar”, explica Javier Tejada, catedrático de física de la Universidad de Barcelona. “Pero ahora la tecnología ha hecho que estos generadores sean más pequeños y potentes y junto a la mejora del *hardware* se ha incorporado una mejora en el *software*, que incorpora unos algoritmos para análisis de imagen que hacen que la tecnología sea útil de verdad”, añade.

Los rayos T penetran capas finas de distintos materiales, como la ropa, el papel o una taza, pero se detienen ante tejidos más gruesos o incluso ante el agua líquida. Sin embargo, tienen una ventaja importante respecto a otros tipos de radiación como los rayos X: no es ionizante. Esto significa que puede servir para construir equipos de imagen médica sin las limitaciones de los que emplean rayos X, que pueden resultar dañinos para los pacientes si se les expone con demasiada frecuencia. Además, los rayos son sensibles a la composición química del objeto que están atravesando, un rasgo muy interesante para todo tipo de análisis.

“En medicina, lo fundamental es que, como tiene una radiación de onda pequeñísima, de menos de un milímetro, esta radiación puede penetrar en la piel y

## Terahercios, de lo más natural en la naturaleza

La radiación de terahercios es algo que se puede encontrar por todos lados en la naturaleza. Todo objeto con una temperatura mayor de dos grados Kelvin la emite en forma de lo que se conoce como ‘radiación de cuerpo negro’ y estas frecuencias han sido muy útiles para conocer el polvo frío que ocupa el medio interestelar o algunos semilleros de estrellas en los que se producen estallidos de nuevos astros.

Los astrónomos utilizan detectores de estas frecuencias en lugares como el Observatorio Submilimétrico de Caltech del Instituto de Tecnología de California, la universidad californiana, el Submillimeter Array del Observatorio Mauna Kea en Hawaii o el Observatorio Espacial Herschel de la Agencia Espacial Europea.

La presencia de las ondas de terahercios en la naturaleza es mucho más fácil de encontrar que otros tipos de radiación electromagnética más energéticas, como los rayos X, que se producen en fenómenos como los relámpagos, en el sol o en monstruos galácticos como los agujeros negros, o los rayos gamma, que también se generan en los estallidos de estrellas o en los núcleos de galaxias activas. ▶

además analizar lo que te encuentras capa a capa”, continúa Tejada. “Esto puede ser interesante para enfermedades como la psoriasis, en las que para curarla tenemos que saber qué sucede capa a capa, y también ocurre algo parecido con el cáncer de piel”, añade.

Los rayos T interactúan con la materia de una manera diferente a otro tipo de rayos y eso hace que ofrezcan posibilidades complementarias. A diferencia de la luz infrarroja, que produce distorsiones en el agua y en otras moléculas, la radiación T provoca movimientos conjun-

tos en grupos de moléculas. El agua la absorbe con intensidad. Por eso, no puede atravesar una masa de este líquido, pero en pequeñas cantidades esa sensibilidad se puede utilizar para hurgar en el interior de los tejidos humanos, que están llenos de él.

Según explicaba Emma Pickwell-MacPherson en la revista *Physics World* recientemente, “los tejidos sanos y los tumorales interactúan de una forma diferente con la luz en el rango del terahercio debido a las distintas concentraciones de sangre y agua, a las estructuras de los tejidos y a otros factores que modifican sus propiedades ópticas”. Si se ilumina con un rayo T un trozo de piel en el que hay células normales y otras cancerosas, las diferencias quedarían reflejadas en el reflejo de la luz. Sin embargo, como el agua absorbe con tanta intensidad este tipo de radiación, es complicado afinar la señal para discernir la que da información relevante sobre un tumor y la que procede de un exceso de sensibilidad. Este factor es uno de los que han ralentizado la adopción de este tipo de tecnología según la experta.

### Biomedicina y otras aplicaciones

La aplicación de los rayos T a la biomedicina se encuentra en una fase de tanteo, tratando en primer lugar de los ámbitos en los que puede aportar una información más precisa o con menos efectos secundarios probables que las tecnologías actuales. En problemas como el cáncer, cualquier método para mejorar la detección precoz de algunos tumores puede ser un impulso para este tipo de alternativas, que también se han planteado como método para calentar y destruir células cancerosas.

Otras aplicaciones de la tecnología ya han mostrado su utilidad. En 2013, Tejada utilizó la radiación que se encuentra entre los infrarrojos y las microondas para destapar la firma oculta del pintor Francisco de Goya en el cuadro *El sacrificio de Vesta*, de 1771. Las ondas T llegan a diferentes capas de la pintura y reconstruyen una imagen tridimensional de la obra. Además, como sucede en el caso de los tejidos humanos, esta frecuencia electromagnética se absorbe y se refleja de manera diferente dependiendo del tipo de pigmento y material con el que se encuentre, algo que proporciona información espectroscópica adicional sobre los materiales utilizados en la obra. Midiendo la intensidad de los rayos de terahercios reflejados e interpretándola con algoritmos matemáticos, apareció la firma de Goya, que se había plasmado con grafito. Este logro habría sido imposible con imágenes de rayos X, por ejemplo, porque la marca de la firma se confundiría con el entorno de la pintura. En este caso, las ondas THz son más sensibles a la composición molecular y la reflectividad del carbón para esta longitud de onda también es diferente de la pintura que lo rodea. Tejada cuenta que el impacto de aquel trabajo fue tal que recibieron multitud de peticiones de museos para buscar

secretos ocultos en las obras de arte sin necesidad de poner un dedo encima de las obras.

Albert Redo-Sánchez, uno de los responsables de aquel proyecto, se planteó entonces si podían ir más allá. Pensó en la posibilidad de leer todo un libro sin necesidad de tocarlo. Como sucede con los estudios de pinturas como las de Goya, algunos libros guardados en museos tienen

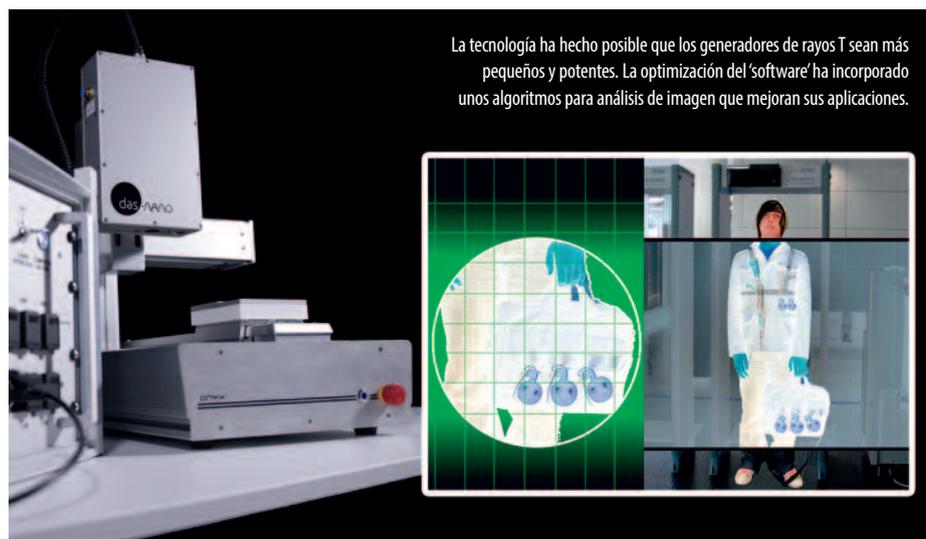
*Una de las frecuencias menos utilizadas hasta ahora es la de los rayos T, que se encuentran en un espacio entre los infrarrojos descubiertos por Herschel*

un valor incalculable y el solo hecho de hojearlos pone en peligro su integridad. Según explica Redo-Sánchez, la radiación de terahercios permitiría extraer el contenido de los libros o de documentos antiguos sin tocarlos. Para comprobar si era posible, él y su equipo del MIT imprimieron letras en nueve hojas y después

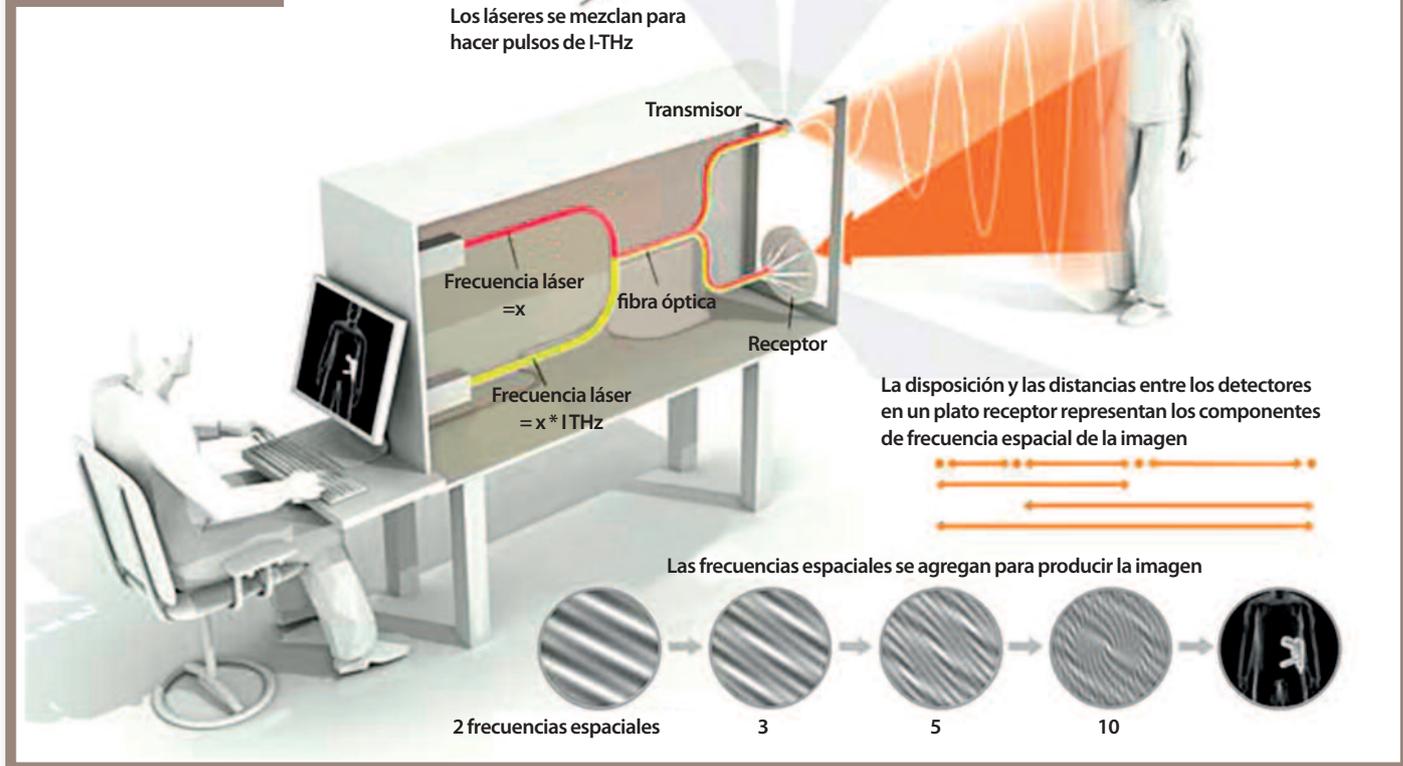
las amontonaron para escanearlas empleando rayos T. Con técnicas anteriores, cuando se intentaban alcanzar las páginas más interiores del libro e identificar las letras impresas, la señal se volvía débil y no era posible acceder más allá de la quinta capa. Con los terahercios, Redo-Sánchez pudo llegar hasta la página número 20, algo que seguiría dejando lejos del alcance de los eruditos los libros más voluminosos, pero que multiplica por cuatro la capacidad de penetración de la técnica anterior.

De la época en que se desveló la firma de Goya con esta tecnología es la creación de una de las empresas pioneras en España en el uso comercial de los rayos T. En 2012 y asesorados por Tejada, Esteban Morrás y Eduardo Azanza fundaron Das-Nano, una compañía con sede en Navarra que ya trabaja con gigantes de la automoción, las industrias aeroespacial y farmacéutica o la banca. “La idea surgió porque previmos que esa parte del espectro electromagnético que aún no se utilizaba demasiado, por la experiencia que tenemos, se acabaría utilizando”, explica Azanza. Por ahora, las tres principales aplicaciones comerciales que tenemos son para la industria eólica, para la aeroespacial y para la inspección de carrocerías de vehículos”, añade. En el caso de las palas, por ejemplo, se puede analizar si hay un pequeño defecto que puede hacer que pierda eficiencia a la hora de convertir el soplo del viento en energía. En este tipo de equipamientos, como en el de los vehículos, la radiación de terahercios puede atravesar capas de materiales no conductores, ofrece información sobre el espesor de las capas y se puede determinar si tienen defectos que escapan a las inspecciones oculares habituales en el caso de los equipamientos eólicos.

Otra de las aplicaciones que también está explorando Das Nano y que tendrá más importancia en el futuro es poder determinar las características físicas del



## ASÍ FUNCIONA EL LÁSER DE RAYOS T



grafeno que se utilice para aplicaciones industriales y ayudar a definir los estándares de calidad de este nuevo material. Muchas de las aplicaciones de la radiación en terahercios tiene que ver con el control de calidad. Ya en 2008, un grupo de científicos demostró que era posible encontrar objetos no metálicos dentro de unas barritas de chocolate. De este modo, era posible detectar antes de que hiciesen daño a los consumidores trozos de piedra, plástico o cristal que habrían superado la prueba del detector de metales que se aplica a estos productos de consumo para evitar que incluyan objetos peligrosos.

En el caso del grafeno, Redo-Sánchez, que también acabó en Das Nano, explica desde un congreso celebrado en San Sebastián en torno a este material que llevan cuatro años desarrollando una tec-

nología para tratar de evaluar su calidad. Aunque en muestras diminutas como las empleadas en algunos proyectos de in-

*La aplicación de los rayos T a la biomedicina se encuentra en una fase de tanteo en los ámbitos que pueda aportar una información más precisa y menos efectos secundarios*

vestigación es posible emplear técnicas de microscopía electrónica, “faltaban métodos de control para analizar mues-

tras más amplias, como puede suceder con una oblea de grafeno de cuatro u ocho pulgadas”, afirma Redo-Sánchez. “Para conseguirlo, desarrollamos un equipo que podía analizar estas obleas de una forma no destructiva y sin contacto con el material”, continúa. Con esta tecnología pretenden ayudar también a crear un estándar de calidad para el grafeno que vaya acompañado de una serie de pautas para alcanzarlo cuando un grupo de investigadores pretenda fabricarlo en su laboratorio. Así, entre otras cosas, será posible que los resultados de distintos centros de investigación o departamentos de I+D de empresas sean comparables y útiles.

Una de las claves para la generalización de estas tecnologías es reducir el tamaño y el coste. Recientemente, un equipo del Fraunhofer Heinrich Hertz



Los rayos T penetran capas finas de distintos materiales, como la ropa, el papel una taza de loza. Y poseen una ventaja importante sobre los rayos X: no son ionizantes.

Institute (HHI) alemán presentó un artefacto diseñado para su aplicación en sistemas de seguridad. La longitud de onda de los terahercios permite ver a través de la ropa, de una cobertura de plástico o de una caja de cartón, algo que es útil, por ejemplo, en un aeropuerto o un control de aduana. En principio, generar las longitudes de onda propias de los rayos T requiere excitar materiales semiconductores con luz de 800 nanómetros, en el límite del rango visible, con un tipo de láser. Esta tecnología no es práctica, y el equipo del Fraunhofer desarrolló un tipo de semiconductor que se puede excitar con luz de 1,5 nanómetros, una longitud de onda que es estándar en las tecnologías de telecomunicaciones ópticas, algo que hace que los componentes ópticos y los láser necesarios no sean tan caros.

En Madrid, la compañía Luz Wave-Labs también trabaja para convertir los rayos T en una tecnología de uso cotidiano. Nacida como una *spin-off* (empresa u organización nacida como extensión de otra) de la Universidad Carlos III, ha desarrollado un generador de THz que com-

bina las ventajas de la electrónica y la fotónica para conseguir, según ellos mismos, “una calidad de señal un millón de veces superior al mejor generador fotónico existente en el mercado”. Como en los casos anteriores, sus avances están consiguiendo que los equipos sean cada vez de

*La radiación de terahercios permitiría extraer el contenido de los libros o de documentos antiguos sin tocarlos*

menor tamaño y tengan un coste que haga que tenga más sentido la generalización de su uso. A diferencia de una máquina de rayos X, los generadores de terahercios son fáciles de transportar, aunque generar imágenes como las que son necesarias para internarse en los se-

cretos de una pintura de hace siglos aún puede suponer meses de trabajo.

Como sucede con otras aplicaciones médicas, la industria farmacéutica ya se puede beneficiar de la capacidad que tienen los rayos T para penetrar en la materia sin dañarla. Este tipo de radiación puede ofrecer una imagen precisa de la estructura de los cristales que conforman un fármaco y de esa manera comprender también mejor su función. En este sentido, tiene un particular interés cómo las diferentes formas cristalinas de un mismo compuesto pueden tener efectos diferentes en la absorción del fármaco o en cómo se excreta una vez que ha cumplido su función. Además, una patente sobre una molécula puede aplicar solo a una de sus formas con sus correspondientes efectos principales y secundarios. Para conocer estas características de los fármacos se ha usado tradicionalmente la cristalografía de rayos X, pero esta técnica es más lenta, difícil de aplicar y no se puede utilizar en una fábrica como se podría hacer con los THz.

### Sistemas de comunicaciones

Por último, se están explorando las posibilidades de esta frecuencia electromagnética como medio para transportar información. Las microondas, muy cercanas en el espectro, ya se utilizan como base para la telefonía móvil, pero la sociedad contemporánea siempre anda en busca de métodos para transmitir más información y más rápido. En un artículo publicado el año pasado en *Nature Communications*, investigadores de la Universidad de Brown (EE. UU.) demostraban por primera vez la posibilidad de enviar datos a través de un multiplexor de terahercios, un aparato que combina varias señales a través de un solo canal. Este sistema, que junta y separa señales, se emplea en todos los sistemas de comunicación, desde los móviles a la televisión. A través de la fibra óptica, viajan miles de

llamadas y cientos de canales de televisión al mismo tiempo que después se separan en las señales que se reciben de forma individual.

Con la transmisión a través de terahercios, será posible enviar datos 100 veces más rápido que con las actuales redes de telefonía móvil que emplean las microondas. La radiación de terahercios tiene longitudes de onda menores que las microondas y así tiene un mayor ancho de banda para la transmisión de datos. Además, esta frecuencia tiene una señal más enfocada que reduciría el consumo energético de las torres de telecomunicaciones.

Los investigadores de la Universidad de Brown pudieron realizar transmisiones a 10Gb por segundo sin errores, menos que lo necesario para reproducir durante una hora una película en Ultra HD, que solo llegaría a 7Gb. En otra prueba, los científicos incrementaron la transmisión de información hasta los 50Gb por segundo, aunque con esta velocidad sí se produjeron errores en la comunicación, aunque estos defectos se podrían corregir con sistemas de reparación que ya se emplean en telecomunicaciones.

Estos sistemas de comunicación ultrarrápida aún tardarán en llegar. Por un lado, los artefactos que están poniendo a prueba investigadores como los de la Universidad de Brown funcionan, pero están lejos de ser lo bastante fiables y reproducibles como para implantarlos a nivel industrial. Además, muchos otros componentes necesarios para una red de telecomunicaciones basada en terahercios aún no existen. Los ingenieros y las compañías que se animen a construir este sistema de comunicación inalámbrica del futuro aún tienen al menos una década por delante, mientras se agota la capacidad de redes como las 4G o las ya casi presentes 5G.

El primer artículo científico sobre la radiación en terahercios se publicó en la década de 1890 en la revista *Physical Review*. Ahora, por primera vez, la tecnolo-

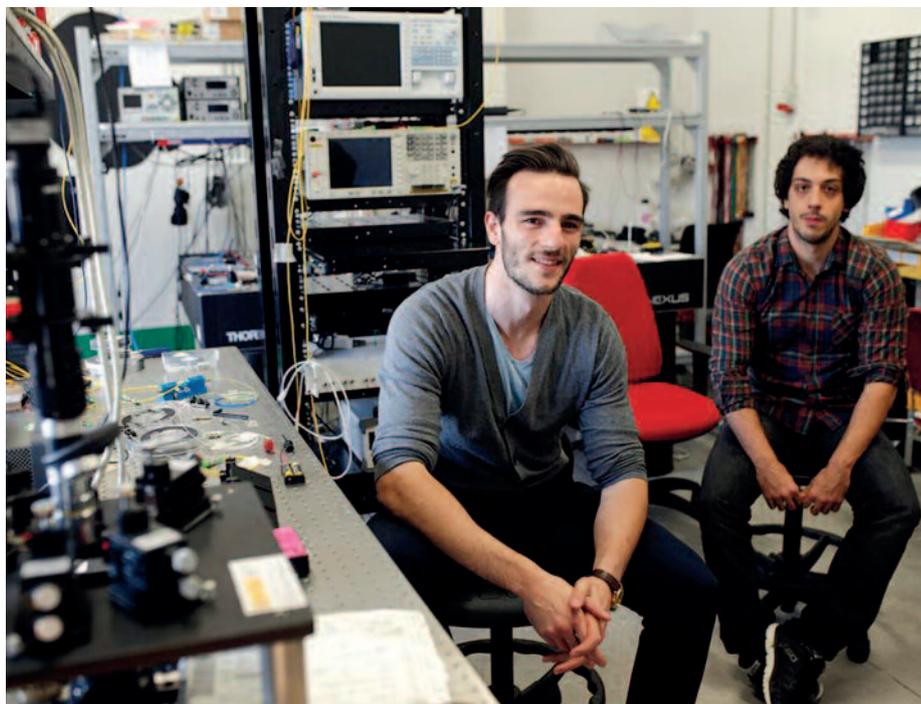
gía parece lo bastante madura como para que haya empresas dispuestas a realizar grandes inversiones que rentabilizarán en un futuro próximo. Algunas estimaciones consideran que, dentro de una década, comenzará a generalizarse el uso de

*La industria eólica, la aeroespacial y la inspección de carrocerías de vehículos son algunas de las aplicaciones comerciales de los rayos T*

los rayos T en muchas de las aplicaciones mencionadas.

Mientras llegan las aplicaciones que conviertan a los rayos T en una presencia tan habitual para el gran público como son los infrarrojos o los rayos X, se puede

reconocer el campo en el que se descubren muchos de estos fenómenos naturales y se comienzan a utilizar en la búsqueda de conocimiento puro, sin una aplicación evidente. Herschel, un astrónomo reconocido por sus descubrimientos astronómicos y por su habilidad tecnológica para construir los innovadores telescopios con que realizarlos, fue el responsable de abrirnos los ojos a las muchas luces que nos rodean. La Agencia Espacial Europea lanzó en 2009 un telescopio bautizado como Herschel en honor al científico alemán, un aparato que era una versión en terahercios del telescopio espacial Hubble. En Chile, la red de telescopios ALMA (Atacama Large Millimeter Array), una de las mayores del mundo, también explora el cielo en esta particular luz de onda en busca de objetos del universo temprano. Como ocurre con frecuencia, antes de conseguir dominar la naturaleza para ponerla al servicio de la humanidad, un pequeño grupo de curiosos ha comenzado a cambiarlo todo haciéndose preguntas.



Rubén Criado y Jesús Palacid, de Luz WaveLabs, en su laboratorio de Leganés (Madrid). Su sistema de producción de rayos T puede analizar materiales sin contacto físico.

Es uno de los científicos españoles más internacionales, probablemente el más reconocido mundialmente en el ámbito de la investigación sobre cáncer. Hizo su primera gran aportación científica en 1982, cuando descubrió el primer oncogén humano, un gen mutado capaz de producir cáncer. Trabajaba entonces en Estados Unidos.

Este bioquímico nacido en Madrid (1949) se fue en 1974 a continuar su formación en el Instituto Nacional del Cáncer en Bethesda, a las afueras de Washington, y cuatro años después constituyó su propio equipo de investigación en el Laboratorio de Biología Celular y Molecular de ese prestigioso instituto.

Mariano Barbacid, bioquímico, investigador del cáncer

# “Lo que denominamos cáncer es un conjunto de enfermedades tan diversas o más que las enfermedades infecciosas”

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

**D**esarrolló en EE.UU. la primera parte de su exitosa carrera científica. Pero, en 1998, cuando era vicepresidente de Oncología Preclínica del Instituto de Investigaciones Farmacéuticas *Bristol Myers Squibb*, decidió regresar a trabajar a España. Diseñó y puso en marcha el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), que dirigió durante varios años convirtiéndolo en un centro de referencia reconocido internacionalmente. No abandonó en ningún momento su labor investigadora y, ahora, aunque ya no dirige el CNIO, trabaja allí en su laboratorio, con unas 15 personas. Desarrollan ratones genéticamente manipulados a los que logran generar tumores muy similares a los de los humanos (se ocupan, sobre todo, de cáncer de pulmón y de páncreas, los más intratables) y con ellos identifican moléculas clave para el desarrollo de los tumores.

Los mejores científicos, los que más profundamente comprenden la materia de la que se ocupan, son frecuentemente los mejores divulgadores, los que saben encontrar las palabras y los argumentos clave para que los no expertos en la materia puedan captar el sentido de su investigación y el conocimiento adquirido. Barbacid es, sin duda, uno de ellos y habla con sorprendente claridad de los

últimos avances en la investigación del cáncer.

**PREGUNTA.** ¿Son todos los cánceres la misma enfermedad o hay diferentes tipos de cáncer?

**RESPUESTA.** No son en absoluto la misma enfermedad. Hay más diferencias entre los distintos cánceres que las que puede haber entre enfermedades infecciosas. Un cáncer de páncreas no tiene nada que ver con una leucemia o con un sarcoma. E incluso entre tumores del mismo órgano, como el cáncer de pulmón, no tiene nada que ver el microcítico (de células pequeñas), con el adenocarcinoma. Los dos ocurren en el pulmón, pero son dos enfermedades completamente distintas que hay que tratar de forma diferente. Es muy importante destacar que lo que denominamos cáncer es, en realidad, un conjunto de enfermedades tan diversas, o más, que las enfermedades infecciosas.

*“Han mejorado mucho los diagnósticos, los tratamientos y la cirugía, la curación más directa y completa para los cánceres que no están diseminados”*

**P.** ¿Todas tienen en común la proliferación descontrolada de células?

**R.** Sí, pero de la misma manera que las enfermedades infecciosas tienen en común que las causa un organismo exógeno, ya sea un virus o una bacteria...

**P.** En los últimos 20 o 25 años parece que ha cambiado mucho la percepción social del cáncer. Si antes se consideraban una condena de muerte casi garantizada, ahora se ven como enfermedades graves, difíciles de tratar, pero no necesariamente mortales. ¿Es así también desde el punto de vista científico y médico?

**R.** No tengo una opinión directa sobre esto, puesto que yo no trato con pacientes. Creo que lo que dice es correcto, pero es muy importante que la gente, cuando hable de cáncer, le ponga apellidos. Lo mismo que no decimos “he estado con José” porque quien nos escucha probablemente no sabrá a qué José nos referimos, ni siquiera “he estado con José García”... Es importante que se pongan apellidos al cáncer porque no es lo mismo tener un cáncer de mama estrógeno-positivo, cuya supervivencia está en el 95% o 98%, que un carcinoma ductal de páncreas, con una super-

vivencia del 4% o el 5% a cinco años, y de casi el 0%, a 10 años. Igual que en las enfermedades infecciosas, si alguien dice “tengo una gripe”, nadie se asusta; pero si dice “tengo ébola”... En el cáncer igual: pongamos nombre y apellidos y entonces sabremos si debemos asustarnos o no.

**P.** Pero, incluso en cánceres recalcitrantes, la supervivencia y la calidad de vida de los enfermos ha mejorado.

**R.** Por supuesto. Han mejorado muchísimo los diagnósticos, los tratamientos y la cirugía, que no deja de ser, para los cánceres que no están diseminados; es decir,

El exdirector del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), Mariano Barbacid, asegura que la investigación oncológica está “en una situación crítica total”.



no metastatizados, la curación más directa y completa. También ha avanzado muchísimo el conocimiento que tenemos del cáncer. En 1998 se aprobó el uso de la herceptina para el cáncer de mama con Her2 positivo, y desde entonces casi todos los nuevos fármacos son terapias dirigidas contra moléculas implicadas en el cáncer. Antes –y todavía ahora para muchos tumores–, la única alternativa era el tratamiento con quimioterapia, agentes citotóxicos que no son específicos. La quimio, con el tiempo, desaparecerá, pero todavía, desgraciadamente porque no hay otra cosa, se da más quimio que terapias selectivas o dirigidas. La herceptina, y poco después Glives (la primera molécula química contra un oncogen, en este caso el de la leucemia mielógena crónica) supuso un cambio de paradigma.

**P.** Desde que usted empezó a investigar en cáncer, ¿cómo ha cambiado el panorama? ¿Dónde estaban entonces los científicos y dónde están ahora?

**R.** Ha cambiado muchísimo. En primer lugar, porque las técnicas de secuenciación [genómica] masiva nos permiten, hoy en día, conocer en cuestión de horas todas las mutaciones que hay en un tumor. Mi equipo aisló, al tiempo que dos grupos estadounidenses, el primer oncogen humano en 1982, y durante una época cada año se descubría un oncogen nuevo. Ahora ya se han descubierto todos, ya podemos saber todos los errores que hay en un tumor; lo que no sabemos todavía es cómo funcionan esas mutaciones; es decir, cómo causan el cáncer. Lo sabemos en algunos casos, pero no en otros muchos.

**P.** ¿Cuántos errores?

**R.** Por ejemplo, con un agente mutagénico como es el tabaco, que provoca entre otros tipos de tumores el adenocarcinoma de pulmón, hay una media de 30.000 mutaciones por tumor, aunque no todas están contribuyendo a la formación del mismo. Evidentemente, no podemos luchar con-

tra todas estas mutaciones. Habrá que entender cuáles son las más críticas e ir a por ellas. Si luchas contra un ejército, no puedes matar a todos los soldados, lo que intentas es matar al general, vas a por quién toma las decisiones. Hay unos oncogenes que son más críticos que otros y contra esos es para los que hay que buscar inhibidores. En un melanoma causado por el Sol también hay unas 30.000 mutaciones de media; de esos 30.000 genes mutados, ¿cuáles son oncogenes? Solamente una fracción, supongamos que sean 100 o 200. El gran reto del cáncer es que no está causado por una ni dos ni tres mutaciones, sino por decenas. Y aún no conocemos cuáles son clave y cuáles meras operadoras.

**P.** ¿Por qué hay unos cánceres peores que otros?

**R.** Es difícil responder. En general, los tumores que tienen un componente hor-

*“Cualquier persona,  
con la vida más saludable  
que imagine, puede  
desarrollar un cáncer  
dependiendo del tiempo  
que viva”*

monal son los menos agresivos y siempre se puede inhibir el componente hormonal: sin componente hormonal, como muchos tumores de mama y próstata, suelen remitir. Pero ¿por qué, en general, es más agresivo el cáncer de páncreas que el de colon? No hay una respuesta clara. Cada caso es distinto. No hay dos tumores iguales.

**P.** ¿Por las mutaciones?

**R.** El tumor es un ente que está mutando constantemente. Se estropean los mecanismos de reparación celular. Tenga en cuenta que durante el tiempo que dura esta entrevista, en nuestro organismo se

dividen millones de células, sobre todo en la cubierta del intestino y del colon, y en la sangre. Y cada vez que se divide una célula se tiene que copiar un libro de 3.000 millones de letras [el ADN de la célula] con un alfabeto de pocas letras, cuatro fundamentales; ¿Cómo se copia eso en un par de horas? En realidad, podría parecer una chapuza impresionante porque no se copia el ADN de principio a fin, sino que se va copiando a trozos, por zonas. Luego esos trozos se van ensamblando hasta conseguir una copia lo más exacta posible, pero en cada proceso de división celular, cada vez que se copia el ADN, se producen errores. Es inevitable. Es como si copiaras a mano un libro y, por mucho que te esmeres, metes una B en lugar de una V, o se te olvida una letra. Y eso en el ADN sería una mutación. Y recordemos que el ADN se copia en un par de horas y en millones de células. Lo que es increíble es que no haya más errores.

**P.** ¿Y en una célula tumoral?

**R.** En una célula tumoral, los mecanismos de reparación de errores [de copia] funcionan peor que en las células normales y se acumulan las mutaciones. En realidad, cada tumor son varios tumores. Hay una serie de mutaciones que son comunes a todo tumor, que suponemos que son las mutaciones que participaron en el origen del tumor, pero luego aparecen otras nuevas que hacen que no todas las partes del tumor sean idénticas. Es decir, una célula tumoral empieza a mutar y va generando heterogeneidad. Por eso, sería muy importante hacer distintas biopsias del tumor porque a lo mejor una determinada mutación que sugiere un determinado tratamiento solo está en una parte del tumor, por lo que ese hipotético fármaco solo actuaría contra una parte del tumor, no teniendo ningún efecto sobre el resto. Estas mutaciones secundarias que se van acumulando durante la progresión tumoral hacen que el tratamiento de tumores avanzados sea cada vez más complicado.

# Los primeros oncogenes humanos

■ Texto **A. Rivera** | Periodista ■

El científico Mariano Barbacid saltó a la fama mundial en 1982 con el descubrimiento del primer oncogén humano. Trabajaba entonces en EE UU. “Los primeros oncogenes se descubrieron en retrovirus y durante años se pensó que eran una curiosidad científica que no tenía nada que ver con el cáncer”, recuerda. “Pero en 1975, dos investigadores estadounidenses (J. Michael Bishop y Harold Varmus) descubrieron que esos oncogenes víricos no eran una curiosidad de tumores en aves, sino que los genes normales, no mutados, estaban también en nuestro organismo”. El descubrimiento les valió el Premio Nobel en 1989.

“Lo que hicimos nosotros fue investigar si esos genes participaban en el cáncer humano y la respuesta fue que sí. Así descubrimos la primera mutación



J. Michael Bishop y Harold E. Varmus fueron galardonados en 1989 con el Premio Nobel de Fisiología y Medicina por su descubrimiento del origen celular de los oncogenes retrovirales.

celular humana relacionada con un cáncer, los oncogenes RAS”, explica Barbacid.

¿El descubrimiento tuvo alguna repercusión terapéutica? “Fue determinante para la ciencia, porque nos dijo que el cáncer estaba causado por mutaciones en determinados genes, pero aquel descubrimiento concreto no ha tenido relevancia terapéutica porque desgraciadamente no hay ningún fármaco selectivo contra los oncogenes RAS, aunque ya los hay contra otros oncogenes”, comenta Barbacid.

“Hoy sabemos que los oncogenes RAS están en casi la cuarta parte de todos los tumores: son muy frecuentes en tumores con muy bajos índices de supervivencia como son los de pulmón y páncreas. Desgraciadamente, aún no hay fármacos contra ellos”. ▶

**P.** ¿Y también las terapias se complican?

**R.** Por supuesto. Le heterogeneidad intratumoral, que es como se conoce este fenómeno, es una de las causas principales, no solo de la falta de respuesta de muchos tumores sino también de las recidivas, pues en la mayoría de los tumores hay ya otras mutaciones que no responden a la terapia inicial y contra las que aún no existen fármacos efectivos. Esto se ha visto en tumores de pulmón contra los que, si bien hay cáncer de pulmón contra el que hay fármacos eficaces, el paciente, al cabo de un año, desarrolla resistencias; es decir, no responde al fármaco porque aparecen mutaciones distintas. Por eso, en el futuro las terapias dirigidas tendrán

que combinar varios fármacos. Una opción no exenta de complicaciones por la acumulación de toxicidades. Recordemos que las terapias dirigidas, aunque son mucho menos tóxicas que la quimio, también tienen toxicidad.

**P.** Hay mutaciones provocadas por agentes externos, como el tabaco, pero ¿hay también mutaciones intrínsecas del organismo? ¿Tiene el cáncer origen genético?

**R.** Tiene un origen genético somático (el factor hereditario supone solo el 5% de los cánceres: principalmente cáncer de mama y colon). Es una enfermedad que está en nosotros, un proceso que no podemos evitar. Cualquier persona, con la vida más saludable que imagine, puede

desarrollar un cáncer dependiendo del tiempo que viva: a los 60 años, la probabilidad es baja, a los 100 la probabilidad es muy alta. Pero si además fumas, o te quemas al sol, o tienes una enfermedad crónica como una cirrosis o una pancreatitis, la probabilidad de tener cáncer es más alta porque tienes más probabilidad de acumular mutaciones.

**P.** ¿Si tiene su origen en los genes, cabe esperar algún tipo de terapia génica?

**R.** Es importante distinguir. El cáncer se debe a mutaciones en los genes que ocurren durante la vida. Solo ese 5% que señalé antes se debe a mutaciones genéticas heredadas y en esos casos (no en todos) sí que se podría, en teoría, intentar cambiar

la mutación. Pero hay que tener en cuenta que toda edición genética va a causar mutaciones en otras partes del ADN lo que, además de consideraciones éticas, desaconsejaría su uso. En el caso del cáncer hereditario sería más práctico hacer análisis de los embriones y eliminar los que lleven esa mutación, igual que con otras enfermedades hereditarias. Eso no es terapia génica, sino selección artificial. La terapia génica contra el cáncer ya está muy desacreditada salvo casos muy puntuales.

**P.** ¿Y la medicina molecular?

**R.** Son las terapias dirigidas o como gusta de llamarse ahora, medicina de precisión. Cuando se suministra un citotóxico (la quimioterapia), no importan las mutaciones que uno tenga: el fundamento científico es que mata a la célula tumoral más eficientemente que a la normal, por lo que hay una ventana terapéutica.

**P.** ¿Por qué?

**R.** No se sabe. Es prueba y error. Por ejemplo, taxol inhibe la mitosis, y si inhibes la división celular todas las células se mueren. Pero en las concentraciones farmacológicamente aceptadas, estos agentes afectan más a las células tumorales que a las normales y hay una disminución de la carga tumoral, llegando en algunos casos a poder eliminar el tumor. No es un tratamiento selectivo, no hace falta saber que mutaciones tienes, mientras que en los tratamientos dirigidos sí. El caso más conocido es el del adenocarcinoma de pulmón (un 30% de los tumores de pulmón). Ya se conocen tres tipos de adenocarcinoma de pulmón con una mutación definida y en dos de los casos ya existen inhibidores selectivos; es decir, ya podemos hablar de medicina molecular o medicina de precisión.

**P.** ¿Con ese tipo de fármacos, solo se ataca a las células que tienen esa mutación?

## Oncología en España

**–La investigación del cáncer en España había alcanzado un buen nivel internacional. ¿Qué tal ha resistido el declive, sobre todo de financiación, que ha sufrido todo el sistema de ciencia español en los últimos años?**

–La investigación oncológica ha sufrido igual que todas, pero hay personas mucho más cualificadas que yo para hablar de esto con datos. Lo que sí le puedo asegurar es que, si no hubiera obtenido financiación de la Unión Europea, concretamente del European Research Council (ERC), no podría seguir trabajando, porque solo con el dinero del Plan Nacional es imposible investigar, al menos en cáncer. Tampoco hay becas y la gente que logra algún contrato tiene que esperar meses a que se haga efectivo. Es pura miseria. En cuanto a las subvenciones del ERC, tampoco representan una solución, pues solo las recibimos 90 científicos en España.

**–¿Es recuperable?**

–Con esfuerzo y con mucha inversión será recuperable. Los científicos no han desaparecido, han emigrado. Cuando vuelva a haber plazas de investigación y dinero, la gente volverá, pero costará mucho más dinero del que se ha recortado en estos años. Y recuperar la confianza... Eso es aún más difícil. Esperemos que el nuevo Gobierno pueda conseguirlo.

**R.** En teoría, sí, pero luego existen efectos secundarios: todos los fármacos tienen toxicidad. Además, hemos de recordar que ya conocemos más de 500 genes que participan en algún tipo de cáncer, y solo tenemos terapias dirigidas contra un número muy pequeño de estos genes mutados.

**P.** No habrá, entonces, una terapia universal.

**R.** Claro, porque no hay un cáncer universal. Igual que no hay una enfermedad infecciosa universal y el antibiótico que te funciona contra un estafilococo no te funciona para el virus de la gripe.

**P.** ¿Y las inmunoterapias?

**R.** Son una revolución. La cuestión que ha traído de cabeza a muchos científicos es por qué nuestro sistema inmune no reconoce el cáncer y lo elimina, como reconoce una infección. Las células tumorales son suficientemente distintas de las normales como para que el sistema inmune las reconozca, pero no lo hace. Parece que el origen del problema está en que las células tumorales expresan unas proteínas que desactivan el sistema inmune. Estas proteínas son parte de nuestra fisiología. Recordemos que cuando tienes una infección, el sistema inmune responde, y cuando esa infección desaparece, nuestro sistema inmune se desactiva. Ahora se sabe que las células tumorales utilizan esas proteínas que en condiciones normales le dicen al sistema inmune “desactívate porque ya se ha acabado la infección”. De esta forma consiguen que nuestro sistema inmune no las ataque. Estos descubrimientos han permitido diseñar unos anticuerpos monoclonales que inhiben la expresión de esas proteínas desactivadoras del sistema inmune, lo que permite a nuestro organismo poder atacar los tumores.

**P.** ¿Impidiendo el camuflaje de las células tumorales?

**R.** Efectivamente. Estos anticuerpos monoclonales permiten al sistema inmune del paciente de cáncer actuar contra las células tumorales. Estos descubrimientos han representado una auténtica revolución en el tratamiento de ciertos cánceres. El problema es que estos tratamientos solo funcionan en algunos tumores y solo en

algunos pacientes. Y mientras no se sepa el porqué, será complicado poder seguir avanzando y mejorar los tratamientos. Además, aún no hay biomarcadores; es decir, si hay cinco pacientes con cáncer de pulmón, un oncólogo no tiene forma de saber *a priori* quién va a responder a estas terapias y quién no. Y como el coste de cada tratamiento ronda los 60.000 euros al año, estamos ante un problema de salud pública. Este tipo de inmunoterapia está teniendo más impacto en melanoma metastásico y en cáncer de pulmón no microcítico, dos tipos de tumores con índices de supervivencia muy limitados. Es importante resaltar la contribución de dos españoles a desarrollo de estas nuevas terapias. En el caso del melanoma, el doctor Antoni Ribas, que trabaja en Los Angeles (California), y en cáncer de pulmón al doctor Luis Paz-Ares, jefe del servicio de Oncología del Hospital 12 de Octubre de Madrid.

**P.** ¿Qué investiga usted ahora?

**R.** Trabajamos en dos tipos de tumores iniciados por el oncogén KRAS. Este oncogén es responsable, o al menos contribuye, en uno de cada cuatro tumores humanos; es decir, tiene una incidencia altísima y, sobre todo, en los tumores de peor supervivencia: pulmón y páncreas. Mediante manipulación genética, hacemos que esos tumores se produzcan en ratones, induciendo en ellos mutaciones en KRAS y P53, los oncogenes más frecuentes en estos tipos de cáncer. Estos animales desarrollan en unos meses tumores histológicamente idénticos a los humanos, aunque lógicamente menos complejos, no solo por el menor tiempo en desarrollarse sino por su menor tamaño.

**P.** ¿Y los curan?

**R.** Parcialmente y mediante manipulación genética. Desgraciadamente, aún no tenemos fármacos selectivos. De hecho, el oncogén KRAS no es farmacológicamente abordable; es decir, no se sabe cómo hacer un fármaco contra él. Afortunadamente, todas las moléculas



“Aún nos queda mucho por conocer respecto al cáncer. A veces me critican por ser demasiado pesimista, pero es muy complejo”, afirma el investigador.

responsables de transmitir sus señales oncogénicas son enzimas y, por tanto, farmacológicamente abordables. Ahora el reto está en saber cuáles son importantes y cuáles no. Llevamos 15 años con esta investigación: vamos inhibiendo estas enzimas selectivamente, de forma genética, y vemos si cuando las eliminamos el tumor sigue proliferando o desaparece. Hemos encontrado tres clases de enzimas implicadas en mediar la función de KRAS: unos que al eliminarlos no sucede nada; es decir, que el tumor sigue creciendo; otros que eliminan el tumor, pero

producen unos niveles de toxicidad no aceptables y, finalmente, un tercer grupo muy reducido de enzimas que al ser eliminados se reduce o desaparece el tumor y además no se producen efectos tóxicos relevantes. Ahora estamos haciendo combinaciones con estas enzimas con actividad terapéutica para mejorar los resultados antitumorales. El reto que se nos presenta ahora es poder generar inhibidores selectivos contra estas enzimas, una tarea que desgraciadamente no parece excesivamente fácil, pero al menos no imposible. ©

# Gabinete Técnico de la presidencia (GTP): algo más que la imagen y las relaciones del CSN

Un organismo como el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) con una misión como la de mantener la seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y del medio ambiente en nuestro país sabe la repercusión que tiene este tema en la población. Así que, además de la parte técnica que conlleva este trabajo, también hay una importante labor que el Consejo realiza hacia el exterior. El Gabinete Técnico

de la Presidencia (GTP) es el encargado de coordinar e impulsar diferentes estrategias, como potenciar los contactos institucionales, nacionales e internacionales y aportar solidez a la imagen del organismo, además de transparencia y credibilidad. Este Gabinete es el apoyo principal de la Presidencia y del Pleno.

■ Texto **Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN | ■

La parte técnica del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es, sin duda, la más compleja del organismo regulador, pero hay algo que es más complicado aún y es transmitir esa labor técnica a toda la sociedad: instituciones, empresas relacionadas con el sector, otros reguladores internacionales, medios de comunicación y a los ciudadanos en general. Esta es la otra cara del CSN, la más visible del organismo y la que, a su vez, guarda el equilibrio entre las decisiones tomadas por la Presidencia y el Pleno del organismo y su forma de comunicarlo a la sociedad.

El responsable que dirige todas estas acciones es el director del Gabinete Técnico

de la Presidencia, cuyo nombramiento por parte del presidente requiere, según establece el Estatuto del CSN, el previo visto bueno del Pleno. De él dependen los asesores y el personal eventual que compone el Gabinete.

El director del Gabinete Técnico de la Presidencia (GTP) es, dentro del Consejo, quien gestiona y ejerce de intermediario entre el Pleno y las demás ramas que lo componen, para utilizar de manera efectiva la comunicación y las relaciones con otras instituciones. Asimismo es el encargado de cumplir cuantas tareas específicas le encomiende el presidente, así como las relacionadas con las actividades del Pleno como órgano colegiado.

El Gabinete Técnico de la Presidencia orienta su actividad hacia el apoyo a las actuaciones de la Presidencia y del Pleno, así como a coordinar e impulsar las diferentes estrategias del organismo hacia el exterior. Para cumplir con estas actividades el GTP se divide en cuatro áreas: Relaciones Institucionales, Relaciones Internacionales, Comunicación y Centro de Información y Publicaciones.

## Los cuatro pilares del GTP

Dentro de sus relaciones con el exterior, las actuaciones del CSN afectan a tres grandes grupos: las instituciones públicas (Cortes Generales, Gobierno de la Nación, gobiernos autonómicos, corporaciones locales y otros entes de la Administración Pública), la sociedad (ciudadanía en general y, en particular, los trabajadores que desempeñan su labor en este tipo de instalaciones y las personas que viven en su entorno), así como otros agentes interesados (partidos políticos, sindicatos, organizaciones no gubernamentales para la defensa del medio ambiente y el desarrollo sostenible, medios de comunicación, colegios profesionales, sociedades científicas y profesionales y organismos internacionales o colectivos diversos, entre otros).

El área del Gabinete encargada de establecer convenios o acuerdos institucionales



El Gabinete Técnico de la Presidencia (GTP) del organismo regulador se ocupa de las estrategias hacia el exterior: Relaciones Institucionales e Internacionales, Comunicación y Centro de Información y Publicaciones.

les y los acuerdos de encomienda con todas las comunidades autónomas es la de Relaciones Institucionales.

Además, este área del GTP coordina las relaciones del CSN con el Congreso de los Diputados, el Senado, la Administración General del Estado, la administración autonómica y la administración local, así como con otras organizaciones e instituciones, incluidas las medioambientales.

Otro de los objetivos del CSN, y en consecuencia de traslación directa al Gabinete, son las relaciones internacionales.

Este departamento coordina la participación activa en foros internacionales que discuten o deciden cuestiones relacionadas con las competencias del organismo regulador, así como en actividades conjuntas e intercambio de información y experiencias con otros organismos reguladores internacionales.

El GTP en relación con las funciones y objetivos establecidos de carácter internacional desarrolla sus actividades en dos niveles: el multilateral, a través de organismos, instituciones, asociaciones y foros

internacionales y el bilateral, a través de acuerdos de cooperación técnica y colaboración con instituciones homólogas.

Asimismo, siguiendo con las funciones del CSN está la de informar a la opinión pública sobre la seguridad nuclear y protección radiológica. A este respecto, el GTP tiene asignada la competencia de desarrollar e implantar la estrategia de la transparencia, la información y la comunicación de la institución. Sin embargo, una de las funciones más importantes de este departamento es la de identificar las

## Entrevista a Enrique García Fresneda, director del Gabinete Técnico de la Presidencia

### “Nuestra misión es transmitir la transparencia, la credibilidad y la solidez de la institución”

Enrique García Fresneda es licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Córdoba y Máster en Liderazgo y Dirección Pública por la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Fresneda comenzó su trayectoria profesional en el Consejo de Seguridad Nuclear en 1990, como becario en temas relacionados con los residuos radiactivos. Tres años después ingresó en la Escala Superior del Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del organismo regulador, donde ha desarrollado su carrera profesional como evaluador e inspector en el área de instalaciones radiactivas, y más tarde en las áreas de residuos de baja y media actividad y de alta actividad. En 2004 fue designado coordinador del proyecto del diseño conceptual del Almacén Temporal Centralizado (ATC). En 2008, tras finalizar el programa de desarrollo directivo del INAP, fue nombrado asesor técnico de consejero del CSN, y en la actualidad, desde 2013, es el director del Gabinete Técnico de la Presidencia.

**PREGUNTA.** A lo largo de su trayectoria en el Consejo de Seguridad Nuclear ha trabajado en campos muy distintos. ¿Cómo fue el cambio de las áreas técnicas a los puestos de gestión y dirección?

**RESPUESTA.** Creo que el cambio desde los puestos técnicos a otros de gestión y de dirección ha sido natural, asociado y consustancial a la experiencia con los años en un contexto organizativo donde fui adquiriendo competencias y



Enrique García Fresneda, director del Gabinete Técnico de Presidencia desde 2013, es responsable de la imagen del organismo regulador.

habilidades con las tareas y responsabilidades que mis distintos superiores me han ido asignando en cada momento.

**P.** Como director del GTP, es responsable de cuatro departamentos muy importantes para la imagen del organismo regulador. ¿Qué es, a su juicio, lo más complicado de gestionar estas cuatro áreas?

**R.** El Gabinete Técnico de la Presidencia, así lo describe el Estatuto del CSN, orienta su actividad hacia el apoyo a las actuaciones de la Presidencia y del Pleno, así como a la colaboración y coordinación con las direcciones técnicas, impulsando para ello las diferentes estrategias del organismo hacia el exterior. En el día a día, el trabajo, obviamente, conlleva la realización de cuantas tareas específicas le encomiende el Pleno como órgano colegiado y proporcionar

(Sigue en la página 22)

(Viene de la página 21)

apoyo y asesoramiento a la Presidencia junto con la gestión en los ámbitos institucionales nacionales e internacionales, además de aportar como misión propia el máximo de solidez a la imagen, transparencia y credibilidad de la institución.

**P.** Desde su perspectiva como director del GTP, ¿cómo cree que ha evolucionado la comunicación en el CSN y las relaciones, tanto internacionales como institucionales?

**R.** Tanto el ámbito de la comunicación, como el de las relaciones institucionales e internacionales, son materias vivas, en evolución continua. Particularmente, la información y la comunicación, en un tema como la regulación nuclear, resulta extremadamente difícil y sensible con directas consecuencias sobre la imagen y credibilidad de la institución. Es por ello que el proceso de la información, transparencia y comunicación pública es estratégico en el mapa de procesos del CSN y uno de los ejes principales del Plan Estratégico del CSN. A nivel internacional, hemos contribuido con el apoyo del resto de personal que realiza actividades internacionales a mantener el reconocido prestigio del organismo, y prueba de ello ha sido el éxito de los eventos de carácter internacional que el CSN ha organizado en España.

**P.** Durante estos casi seis años que lleva en el cargo, ¿cuáles son los retos a los que se ha enfrentado?

**R.** Durante este tiempo ha habido un cambio en el paradigma y uso de las nuevas tecnologías en todos los sectores de la sociedad y en su relación con la Administración del Estado, y esto también ha tenido su reflejo en la actividad del CSN.

Desde el punto de vista personal, como responsable de una unidad administrativa, el reto principal era y sigue siendo, la coordinación de un equipo de personas de determinadas disciplinas, con formación y experiencias diversas y complementarias, tanto en el propio CSN como en el resto del

sector público o privado, y alinearlos hacia los cometidos y funciones propias del Gabinete. Desde la perspectiva de este interés general y del servicio público, en el ámbito de la transparencia pública, el primer reto interno fue la potenciación, sistematización y caracterización de un sistema integral de información y comunicación del CSN al público, que debía incorporarse en una de las líneas del Plan Estratégico y cuyo desarrollo implicó abordar varios proyectos, que se materializaron en la renovación de la página web, en aplicaciones para atender y gestionar los canales y solicitudes de información, en una estandarización y en la homogenización de los protocolos internos dentro del propio Gabinete.

Personalmente, consideraba un reto, que se ha conseguido, la gestión del buzón de consultas a través de la página web institucional, como parte del sistema de información, transparencia y comunicación del CSN, pero a su vez, desde el punto de vista de la gestión del conocimiento dada la elevada rotación, por el carácter de personal eventual de los miembros que conforman el Gabinete Técnico de la Presidencia, asimilándolo, como una parte alícuota del problema general de envejecimiento de todo el personal del Consejo.

En el plano parlamentario, se ha planteado durante estos últimos años un nuevo reto, mantener el nivel de continuidad y proximidad en las distintas comisiones y Ponencias del Congreso de los Diputados encargadas de las relaciones con el CSN, para dar respuesta tanto a las resoluciones emitidas, como a las solicitudes de comparecencia y preguntas de diputados y senadores. Para desarrollar esta actividad correctamente la coordinación con las direcciones técnicas es indispensable. No hay que olvidar la complejidad técnica de algunos de los asuntos y materias que son competencia del CSN, que no es otra que, la seguridad nuclear y la protección radiológica. 

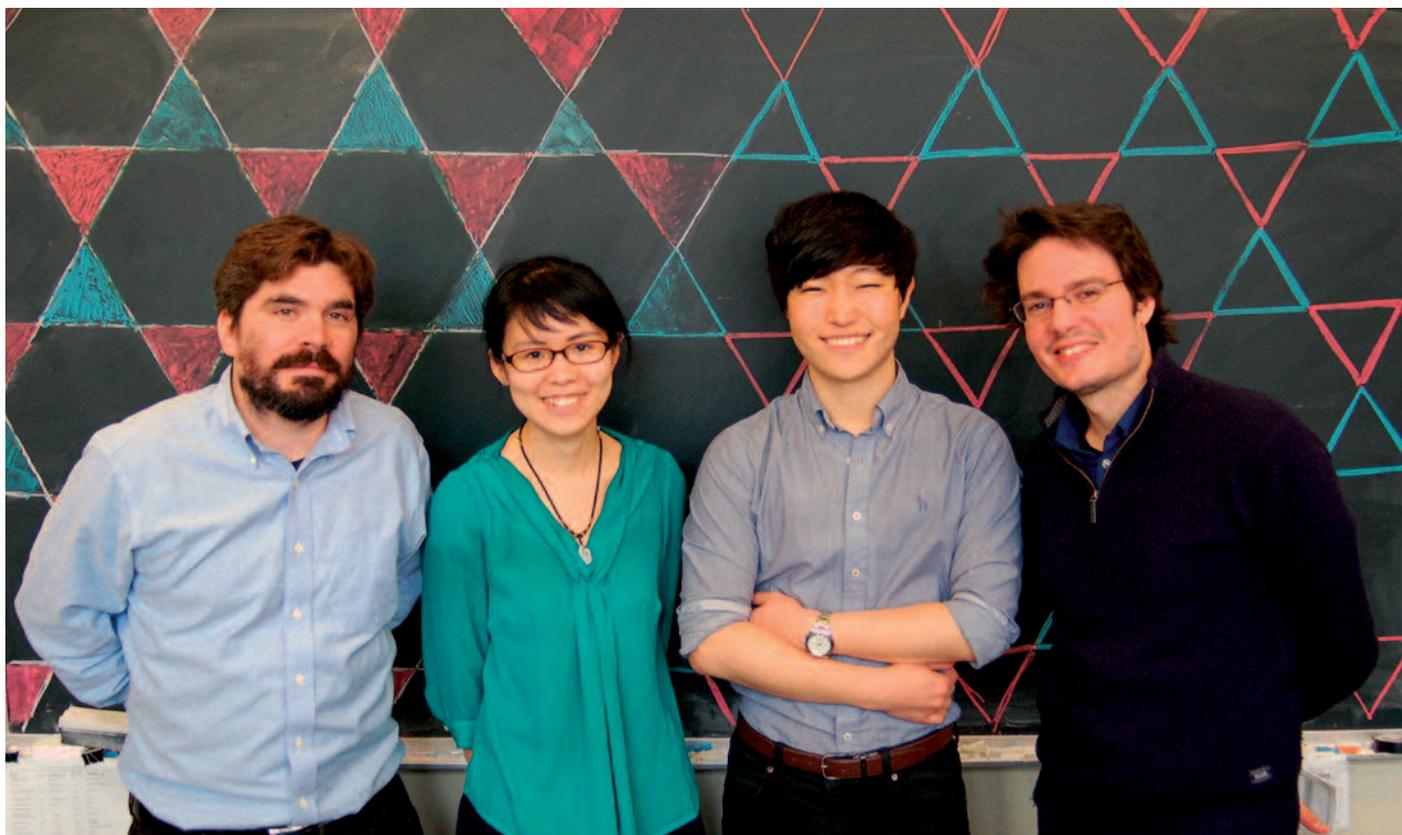
necesidades de información que demanda la sociedad, realizar propuestas y desarrollar los canales de información y comunicación, así como solicitar la información técnica necesaria para ser difundida, adaptándola para su publicación y difundirla a través de los canales oportunos.

La política de información y relaciones con los medios de comunicación del CSN se desarrolla en el Plan de Comunicación en sus tres vertientes: comunicación interna, externa y comunicación en situaciones de respuesta a emergencia.

Otro aspecto relevante dentro del GTP es la misión de los asesores ya que dan respuesta a las demandas de los medios de comunicación aplicando los criterios de transparencia, precisión y la rapidez que permite el rigor técnico.

También proponen y desarrollan las estrategias de comunicación del Pleno que se consideren más adecuadas para garantizar la transparencia y el acercamiento del CSN a la sociedad, así como para conocer la percepción acerca del organismo regulador y de sus actuaciones.

Por último, encontramos la sección que se encarga de la atención directa al público, la difusión y la edición de publicaciones del CSN y en este caso el GTP se encarga de proponer al Pleno y desarrollar los criterios generales en materia de edición y distribución de las publicaciones, gestionar el Centro de Información del Consejo y organizar el ciclo anual de conferencias y jornadas, además de elaborar y coordinar el protocolo de las actividades institucionales del organismo. 



En la imagen superior, de izquierda a derecha, Joe Checkelsky, Linda Ye, Min Gu Kang y Riccardo Comin, que forman el equipo de investigadores creador del kagome y de sus propiedades cuánticas.

Físicos del MIT desarrollan un material revolucionario a partir de un patrón de la cestería japonesa

## Metal Kagome, un material exótico para la electrónica cuántica

Qué tienen en común la cestería japonesa y la mecánica cuántica. En principio, compartir un nombre y un patrón. Las cestas de kagome se fabrican con tiras de bambú tejidas con un patrón simétrico de triángulos entrelazados que comparten la esquina y son una de las tradiciones de la cultura japonesa. Este patrón ha gene-

rado muchas veces la curiosidad de los científicos, planteando la hipótesis: es posible organizar los átomos de un metal u otra sustancia conductiva siguiendo sus enlaces y obtener un material con propiedades electrónicas cuánticas exóticas.

■ Texto **Pura C. Roy** | Periodista | ■

Las posibilidades de este patrón simétrico llevaron a los científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la Universidad de Harvard y el Laboratorio Nacional *Lawrence Berkeley* a centrar sus estudios

en él y, a principios de 2018, anunciaron la creación de un nuevo material exótico llamado kagome metal, un cristal eléctricamente conductor, compuesto por capas de átomos de hierro y estaño dispuestos en un patrón de celosía. El nuevo material

se describe en un estudio publicado en la revista *Nature*.

Los investigadores observaron que al hacer fluir una corriente a través de las capas atómicas dentro del cristal, la corriente reaccionaba de forma inusual y que la

disposición triangular de los átomos originaba comportamientos extraños, de tipo cuántico, en la corriente de paso. El equipo pensó que los electrones de la corriente fluirían directamente a través del enrejado, pero se doblaron en los finísimos senderos circulares y fluían por los bordes sin perder energía.

Este comportamiento es ‘similar’ al llamado efecto Quantum Hall, en el que los electrones que fluyen a través de un material bidimensional exhibirán un “estado quirral y topológico” en el que se doblan en trayectorias circulares estrechas y fluyen a lo largo de los bordes sin perder energía.

El término *kagome Lattice* (enrejado o celosía) no es nuevo, se vienen estudiando sus posibilidades desde los años cincuenta cuando investigadores japoneses se percataron de que algunos minerales magnéticos contienen capas atómicas en dos dimensiones en su estructura cristalina.

### Redes de kagome

Joseph Checkelsky, coautor del estudio y profesor asistente de física en el MIT, explica que al construir la red de kagome con hierro, un material intrínsecamente magnético, el extraño comportamiento persiste incluso a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Ciertos compor-

tamientos llamados exóticos han necesitado de muy bajas temperaturas. “Las cargas en el cristal no solo sienten los campos magnéticos de estos átomos, sino también una fuerza magnética puramente cuántica de la red. Esto podría generar una conducción similar a la superconductividad, en las futuras generaciones de materiales”, explica Checkelsky.

*Para construir el metal kagome los investigadores unieron hierro y estaño y calentaron el polvo resultante en un horno a 750° C*

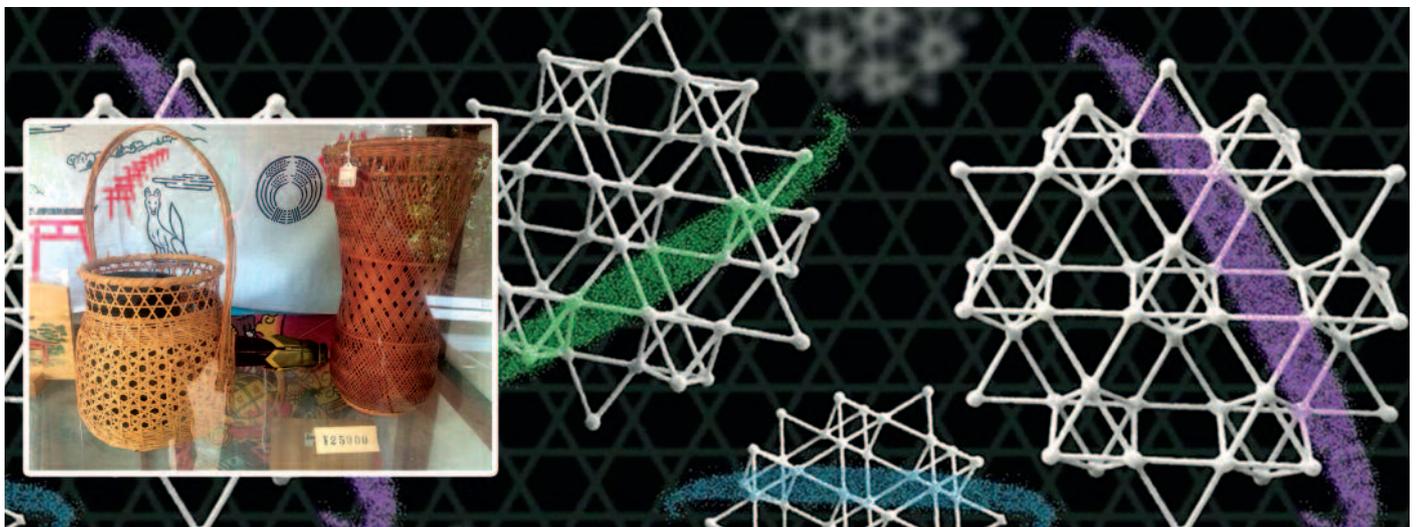
Para explorar estos hallazgos, el equipo midió el espectro de energía dentro del cristal, utilizando una versión moderna de un efecto descubierto por primera vez por Heinrich Hertz y explicado por Einstein, conocido como el efecto fotoeléctrico.

Para Riccardo Comin, profesor asistente de física en el MIT y miembro del equipo lo que ocurre en este nuevo mate-

rial es que “fundamentalmente, los electrones se expulsan primero de la superficie del material y luego se detectan en función del ángulo de despegue y la energía cinética. Las imágenes resultantes son una instantánea muy directa de los niveles electrónicos ocupados por los electrones, y en este caso revelaron la creación de partículas ‘Dirac’ casi sin masa, una versión de fotones cargados eléctricamente, los cuantos de luz”.

Teóricamente, esto se explica por la presencia de los átomos de hierro y estaño que constituyen la retícula. Los primeros son magnéticos y dan lugar a una “destreza” o quiralidad. Los segundos poseen una carga nuclear más pesada, produciendo un gran campo eléctrico local. A medida que una corriente externa fluye, percibe el campo de estaño no como un campo eléctrico sino como un campo magnético, y se aleja”, matiza Comin.

Teóricamente, con anterioridad ya se había predicho que las redes de kagome podían albergar estados electrónicos de Dirac que podían conducir a fases aislantes topológicas y al número de Chern. El número de Chern determina el número de canales unidireccionales (quirales) que se propagan por el borde de la muestra. La topología es la rama de las matemáticas



El término ‘kagome Lattice’, enrejado o celosía como el de las cestas de la imagen, se usa desde los años cincuenta, cuando investigadores japoneses se percataron de que algunos minerales magnéticos contenían capas atómicas en dos dimensiones de su estructura cristalina.

que estudia qué propiedades de los cuerpos geométricos permanecen invariantes cuando los deformamos de manera suave.

### Metal kagome

Para construir el metal kagome, los investigadores unieron hierro y estaño, calentaron el polvo resultante en un horno a aproximadamente 1.380 grados Fahrenheit (750 grados Celsius), porque en este punto los átomos de hierro y estaño se cristalizan y comienzan a organizarse en un enrejado similar al patrón kagome. Luego los cristales se sumergen en un baño de hielo, lo que ayuda a que los patrones enrejados permanezcan estables a temperatura ambiente.

Linda Ye, también del MIT y coautora del estudio, explica que el patrón de kagome deja grandes espacios vacíos que podrían ser fáciles de ‘tejer’, pero como a menudo los sólidos cristalinos son inestables, es mejor utilizar un embalaje de átomos. Por lo tanto, estos espacios se cubrieron con un segundo tipo de átomo que permanece estable a altas temperaturas.

Generar propiedades eléctricas especiales llevará a los científicos a investigar con nuevas formas de generar kagome, ya que opinan que con él se podrán fabricar dispositivos eléctricamente eficientes al no perder energía y ser empleados en líneas eléctricas o circuitos electrónicos súper rápidos. “Por lo tanto, esta nueva tecnología podría aplicarse al campo de la computación cuántica”, opina Checkelsky. Por ahora, las aplicaciones de este descubrimiento se limitarán al campo teórico, ya que quedan muchas cosas aún por corroborar y descubrir en este interesante campo científico. Las aplicaciones prácticas que podrá tener este descubrimiento son ahora difíciles de imaginar, pero haberlas las habrá.

### La inspiración japonesa

La inspiración japonesa también se manifiesta en los laboratorios españoles. Distintas investigaciones se centran en domi-

## El inesperado Efecto Hall

Para entender este fenómeno, exclusivo de ciertos materiales electrónicos, hay que remontarse a 1879, cuando Edwin Hall hizo un descubrimiento inesperado: observó que, al hacer pasar una corriente eléctrica por una lámina metálica en presencia de un campo magnético, aparecía en la lámina una caída de tensión, o voltaje, en la dirección perpendicular a la corriente y el campo. “Este voltaje, que hoy sabemos que se debe al cambio de dirección que imprime un campo magnético a los electrones que constituyen la corriente, permite medir con precisión la densidad de carga eléctrica de un conductor, en especial en los semiconductores usados en electrónica. El siguiente descubrimiento lo hizo Klaus von Klitzing –premio Nóbel de física en 1985–, en 1980, al observar que, bajo ciertas condiciones, el voltaje Hall en dispositivos de silicio se comportaba de un modo distinto al observado hasta entonces. Si los electrones eran obligados a moverse en las dos dimensiones de un plano, en presencia de un campo diez veces superior a los usados habitualmente en el laboratorio y a temperaturas próximas al cero absoluto (-273°C), entonces el voltaje Hall, en lugar de aumentar proporcionalmente con la intensidad del campo, crecía a saltos, o escalones: el efecto Hall se había vuelto cuántico”, explica en un artículo Emilio Méndez, catedrático de Física y premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica 1998. La formulación de este fenómeno, que se llama efecto Hall cuántico fraccionario, otorgó el Nobel de Física de 1998 a Horst L Störmer. Robert B. Laughlin y Daniel C. Tsui.



Riccardo Comin y Linda Ye, coautores del estudio, descubrieron que el patrón de kagome deja grandes espacios vacíos fáciles de ‘tejer’.



Linda Ye, en su laboratorio del MIT. La investigadora asegura que con el kagome cuántico se podrán fabricar dispositivos electrónicos de alta eficiencia.

nar el mundo cuántico teniendo en el punto de mira a las ancestrales y originales técnicas japonesas de generar formas.

“Los metamateriales reconfigurables en forma son capaces de lograr un cambio morfológico al aplicar cargas y mantener la forma deseada cuando se elimina la carga”, explica Johan Christensen del departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la UC3M y coautor de un artículo sobre los desafíos a los que se enfrentan los metamateriales mecánicos flexibles en la revista *Nature Reviews Materials*. “Estos metamateriales exhiben funcionalidades exóticas, como transformaciones de patrón y forma en respuesta a fuerzas mecánicas”, señala el estudio. Un ejemplo son las estructuras basadas en el origami (el arte del plegado del papel para obtener figuras de formas variadas) o en el kirigami (el arte del papel cortado para obtener polígonos).

“La investigación en el campo de los metamateriales, diseñados para tener

propiedades inusuales como que puedan cambiar su forma o dureza, ha avanzado mucho en los últimos años de la mano de tecnologías como la impresión 3D, la simulación por ordenador o ciertas innova-

*El metal kagome  
permitirá fabricar  
dispositivos eléctricamente  
eficientes que podrían  
aplicarse al campo  
de la computación cuántica*

ciones conceptuales”, comenta Christensen. En este estudio, los investigadores también han analizado algunos de los retos a los que se enfrentan los científicos que trabajan en este campo, como el impacto que tienen ciertas tecnologías que

se encuentran en pleno desarrollo, como la impresión 3D o el corte por láser, por ejemplo. “Muchas de estas técnicas aún se encuentran en sus primeras etapas”, señalan, pero abren la posibilidad de combinar materiales con funcionalidades específicas para obtener metamateriales híbridos con “propiedades optomecánicas, termomecánicas o electromecánicas”.

Christensen desarrolla esta línea de investigación sobre metamateriales en el marco de un proyecto científico financiado por la Unión Europea que se denomina *Frontiers in Phononics: Party-Time Symmetric Phononic Metamaterials* (PHONOMETA). En este contexto, su objetivo es analizar y diseñar una nueva generación de metamateriales basados en semiconductores piezoeléctricos que permitan optimizar el funcionamiento de sistemas acústicos complejos, como los sónar utilizados en los submarinos. Dentro de sus diseños también interviene la investigación con el patrón kagome. 🌐

# Gestión del Conocimiento

La gestión del conocimiento se define como el enfoque integrado y sistemático encaminado a identificar, gestionar y compartir los conocimientos de una organización, así como a posibilitar que grupos de personas creen colectivamente nuevos conocimientos para facilitar la consecución de los objetivos de la organización. Un tema que el CSN aborda desde 2014

con la puesta en marcha del proyecto denominado RECOR. ■ Texto **Carlos Castelao López** | Jefe de la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento del CSN | **Carlos Merino Moreno** | Responsable del proyecto de Gestión y preservación del conocimiento que ICA2 está llevando a cabo en el CSN. Doctor en Organización de Empresas y Profesor de la UAM | ■

**E**l Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha desarrollado una importante actividad en este campo, concretada en la propuesta de un modelo para la creación de capacidades de los organismos reguladores basado en cuatro pilares:

- La formación y entrenamiento (*Education and Training*)
- El desarrollo de recursos humanos (*Human Resources Development*)
- La gestión del conocimiento (*Knowledge Management*)
- La participación en redes de conocimiento (*Networking*)

El objetivo del CSN es desarrollar un modelo de gestión del conocimiento adaptado a sus propias necesidades, basado en las recomendaciones del OIEA, que se incorpore al Sistema de Gestión y que utilice los elementos característicos de la gestión del conocimiento que ya tiene disponibles.

En 2014, el CSN, con el apoyo de una empresa de consultoría, dio un primer paso para abordar la gestión del conocimiento, realizando un estudio sobre “Evaluación de Procesos Críticos de Conocimiento Técnico” en la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear, estudio que generó un conjunto de recomendaciones.

Durante 2016 se ha desarrollado un plan de acción sobre este tema enfocado a la preservación/recuperación del conocimiento y experiencia de los técnicos del

CSN nacidos antes de 1952. Se ha aplicado a 16 técnicos, comenzando por una fase piloto para cuatro técnicos que se jubilaron en el transcurso del primer semestre de 2016, ampliándose hasta alcanzar los 16 entre finales del año 2016 y mediados del 2017.

La metodología empleada en este plan de acción de 2016 se denominada

*Durante 2016,  
el CSN ha desarrollado  
un plan de acción enfocado a  
la preservación y recuperación  
del conocimiento  
y experiencia de los técnicos  
nacidos antes de 1952*

Proyecto RECOR y comprende las siguientes fases:

1. **Fase de preparación:** Identificación de los poseedores del conocimiento crítico
2. **Fase de extracción y sistematización del conocimiento.**
3. **Fase de aprovechamiento:** Despliegue de una agenda de aprovechamiento de los conocimientos sistematizados

Como resultado de este plan de acción, se han desarrollado 16 libros de conocimiento (*knowledge book*); cada uno incluye el perfil del puesto de trabajo, los

dominios del conocimiento, el marco relacional, documentos vinculados al puesto de trabajo (procedimientos y procesos), experiencias, conocimiento suscitado (narrativas, fichas técnicas, píldoras audiovisuales), y productos de conocimiento (series, talleres de transferencia, etc.).

Además se ha desarrollado un modelo de gestión del conocimiento, un procedimiento de preservación de conocimiento clave del CSN y varias sesiones de formación de facilitadores.

En 2017 se ha continuado con el modelo iniciado y se han sentado las bases para su continuidad. Así, la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear, responsable de la fase inicial de esta metodología, presentó a la Comisión del Sistema de Gestión y Seguridad el documento ‘Modelo de Gestión del Conocimiento del CSN. Propuesta de Acciones 2017-2020’, acordándose que se presentaría al Pleno del CSN para análisis y, en su caso, aprobación. Este documento señala que “las jubilaciones previstas en años próximos requieren un conjunto de acciones orientadas a la preservación de conocimiento que, junto con las personas de nuevo ingreso, permitan abordar de forma integrada un modelo más amplio de gestión de conocimiento mediante los siguientes componentes: mapa de conocimiento, preservación del conocimiento, socialización del conocimiento, estructura organizativa, herramientas informáticas,



El (CSN) inició el proyecto RECOR tras la incorporación de veinte nuevos funcionarios al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en 2016.

métricas e indicadores y procesos organizativos implantados en el CSN”.

El Pleno del CSN aprobó el Modelo de Gestión del Conocimiento antes referido y acordó “aprobar que la responsabilidad para desarrollo e implantación del Modelo de Gestión del Conocimiento del CSN recaiga en la Unidad de Investigación y Gestión del Conocimiento.”

De esta forma, el CSN da también respuesta a la Resolución decimoquinta del Congreso de los Diputados de junio de 2017: “Decimoquinta. El Congreso de los Diputados insta al Consejo de Seguridad Nuclear a mantener, a través de una eficaz política de recursos humanos, la preservación de la gestión del conocimiento, como eje esencial de funcionamiento del órgano regulador basado en su capital humano.”

En 2017 se ha consolidado la metodología de gestión del conocimiento, que necesita un desarrollo más profundo, basado en la aplicación informática ya en uso. Para llevar a cabo este desarrollo, IDGC cuenta con la ayuda de la consultora ICA2, una organización externa especialista en esta materia. En este artículo, Carlos Merino, experto en Gestión del Conocimiento pertenecien-

te a ICA2, explica la filosofía intrínseca a esta metodología.

### El proyecto RECOR

Las organizaciones que pretenden ser excelentes cuidan su oficio y, en gran medida, éste se representa considerando al conocimiento como un activo fundamental. La condición de activo se relaciona con su importancia en la creación de valor organizativo, es decir, no es un recurso al servicio de un proceso, es un recurso al que se pone unos procesos a su servicio de cara a que puede hacer posibles las funciones de la organización. Si esto no se entiende bien, hacemos a las personas esclavas de los procedimientos y si el contexto de trabajo es intenso, tratarán de ‘contentar’ los trámites que obligan los procedimientos en lugar de aprovechar el potencial de talento de las personas que siempre puede actuar a pesar de que el marco legal o la singularidad sectorial sea muy restrictiva.

Esos procesos al servicio del conocimiento y que lo confirman en la categoría de activo se pueden citar de forma sencilla: proteger el conocimiento, cuidarlo, desarrollarlo, aprovecharlo, com-

partirlo, etcétera. A grandes rasgos, esta es la base operativa de cualquier modelo de los llamados de gestión del conocimiento.

Ahora bien, es preciso tener claro dónde se encuentra este activo de conocimiento y, obviamente nos centramos en las personas como eje, no solo internas del CSN, sino principalmente en todo el contexto externo afín al Consejo, sin menoscabo de aprovechar el conocimiento de cualquier agente socioeconómico que pueda aportar valor.

En este argumento, la teoría de la gestión del conocimiento tiene en cuenta el conocimiento tácito (difícilmente codificable, experiencial) y el conocimiento explícito (codificable, fácilmente transferible), por lo que el conocimiento se encuentra en toda la base de registros o contenidos disponibles dentro y fuera del CSN, a la que es preciso dotar de adecuada calidad de los registros, actualización, mantenimiento, criterios de consulta, accesibilidad, etc.

Por tanto, se requiere activar tanto la entidad ‘personas’ como ‘contenidos’, considerando procesos específicos para su protección, aprovechamiento e intercambio. En general, los procesos (más allá de su denominación) responden a cuatro grandes dimensiones:

- **Conectar**, con el que se busca identificar lo que sabemos y lo que se sabe en el mundo.
- **Ordenar**, cuyo planteamiento se centra en aprovechar lo que sabemos desde una óptica de recursos o contenidos.
- **Socializar**, que cubre la parte vinculada con el aprovechamiento del conocimiento tácito (no documentada), basado en un marco de lecciones aprendidas y buenas prácticas.
- **Desarrollar**, como enfoque que se asocia con mejorar lo que sabemos, a saber, desarrollar competencias, mejorar e innovar.

No obstante, toda esta actividad re-

quiere orden, agenda y recursos, es decir, se parte de la misión de la organización y sus funciones para establecer la estrategia más conveniente de articulación de la gestión del conocimiento considerando un modelo de base que pueda ir progresivamente desplegándose (figura 1). Esto es lo que viene trabajando el proyecto RECOR en el CSN. La prioridad inicial se detectó en los procesos de preservación del conocimiento derivados de la coyuntura actual de relevo generacional. En este sentido, las diferentes alternativas o ejes de actuación establecen el desarrollo de una serie de procesos de trabajo diferenciados, cuya cobertura requerirá de recursos organizativos, competencias y soportes tecnológicos.

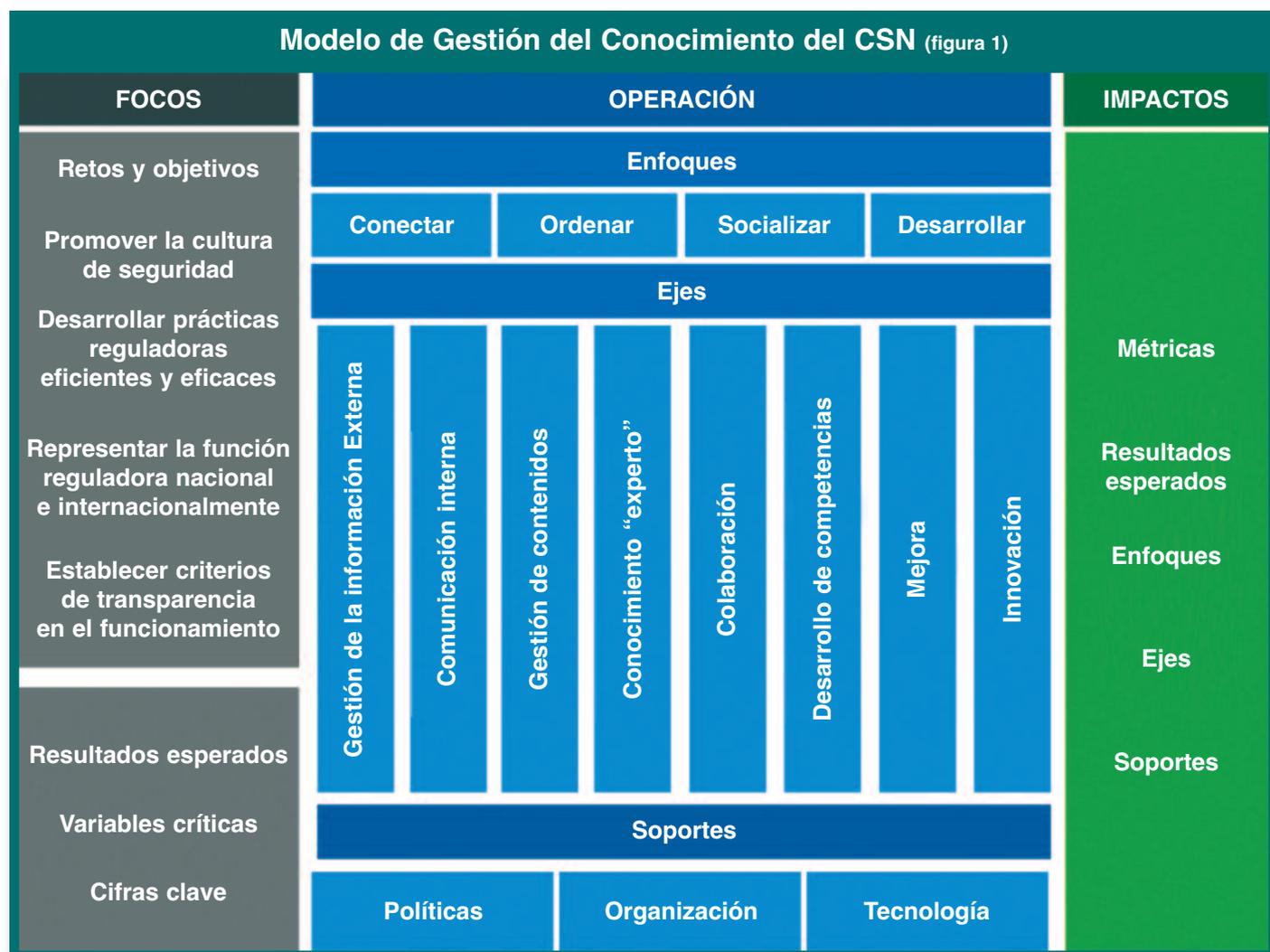
Hay ejes que se relacionan muy directamente con algún enfoque (conectar, ordenar, socializar y desarrollar); no obstante, todos los ejes pueden interpretarse o relacionarse bajo la óptica de cualquiera de ellos. Cada eje se expone a continuación de forma resumida:

- **Gestión de la información externa.** Este es uno de los ejes más comunes para el arranque de la gestión del conocimiento en una organización dado que si se pretende seguir las lecciones aprendidas, buenas prácticas, cambios, mejoras o innovaciones un comportamiento lógico sería controlar el ‘estado del arte’ de lo que ya se sabe o existe.

- **Comunicación interna.** Este eje no suele ser tenido en cuenta en el marco de la

gestión del conocimiento dado que no se considera habitualmente como un tema dentro de este esquema. Sin embargo, la conexión de la organización ya se ha visto como algo fundamental para reforzar los activos intangibles. Es más, una parte importante de ‘saber lo que sabemos’ viene determinado por un correcto ejercicio de comunicación interna.

- **Gestión de contenidos.** Este es uno de los ejes más tratados en las organizaciones, dado que se ha venido comprendiendo (de forma confundida) la gestión del conocimiento como el manejo de documentos. Este paradigma ya se ha superado en muchos casos (no en todos) y es preciso comprenderlo bien para hacer de los contenidos una parte explícita





El consejero del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Javier Dies, durante su participación en el segundo Simposio Internacional sobre Educación, Capacitación y Gestión del Conocimiento Nuclear que se celebró en noviembre del pasado año, en Buenos Aires.

de conocimiento que sea amigable y de valor.

- **Conocimiento experto.** En este eje se habla de conocimiento, no de expertos, para evitar sesgar el marco de identificación de tales personas. Así, el conocimiento experto puede estar en cualquier individuo, independientemente del tiempo que lleve en la organización y su cargo. En este sentido, el eje se centra en la consideración de la importancia del conocimiento tácito, difícilmente codificable y que requiere formas específicas de aprovechamiento y preservación.
- **Colaboración.** Establecer un enfoque de trabajo colaborativo es la esencia de una organización que aprende y que aprovecha lo que sabe y lo que se sabe. Este eje debe estructurarse adecuadamente, dado que la colaboración necesita contar con un foco

específico para dotarle de propósito y obtener resultados de la misma.

- **Desarrollo de competencias.** Este es otro de los ejes habituales que se trabajan en las organizaciones dentro del marco de la gestión del conocimiento, sobre todo en lo que se denomina 'plan de formación' que suele ser comprendido como catálogo de cursos (y muchas veces solamente de oferta, lo que suele impactar negativamente sobre el aprovechamiento). Considera el paso de la formación a un concepto de 'dinámicas de aprendizaje', que abre un escenario innovador y más flexible a la hora de desarrollar competencias.
- **Mejora.** Este eje es otro de los más habituales en las organizaciones dentro de lo que se entiende por desarrollo de la gestión del conocimiento. Se habla principal-

mente del plan de calidad y de los diagnósticos. Muchas de las realidades se caracterizan por una cantidad de diagnósticos muy relevante y poca acción posterior (sin continuidad). Es preciso tener en cuenta que los asuntos de mejora no deberían ser únicamente un plano de trabajo para mantener un sello de calidad (tipo ISO), sino ser una verdadera filosofía de mejora continua con resultados.

- **Innovación.** Este eje final se establece alrededor de la generación de nuevo conocimiento más rupturista (va más allá de la mejora), lo que supone crear condiciones para que la creatividad y la innovación sean factores representativos de la realidad de la organización, es decir, que formen parte de una agenda que se asume y a la que se le va a prestar atención. Cuando una organización culmina la ar-

ticulación de la gestión del conocimiento de forma exitosa, siempre llega a la mejora y la innovación (a las dos).

No obstante, los diferentes ejes requieren una serie de apoyos organizativos que permitan generar un clima y recursos favorables a la gestión del conocimiento. De esta forma, el modelo concentra su atención en tres aspectos: políticas, organización y tecnologías. A continuación se comentan cada una de ellas.

- **Políticas.** Representan directrices corporativas para fomentar la aportación y transferencia de conocimiento y así estimular una cultura del ‘conocimiento como valor organizativo’. Estas reglas servirán para establecer compromisos organizativos que faciliten la generación de espacios y rutinas de intercambio de conocimiento y la implicación necesaria de las personas para participar en ellos. De esta forma, se propicia el establecimiento de un marco de sensibilización para concienciar a las personas sobre la importancia de compartir y los beneficios que aporta, tanto a nivel individual (para la mejora de su trabajo) como a nivel institucional (para la mejora de la función reguladora).

- **Organización.** En el plano organizativo la gestión del conocimiento debe contar con una unidad responsable (Comité del Sistema de Gestión) que vele por la integridad del Modelo y el cumplimiento de las actividades previstas en el plan de implantación y despliegue de la gestión del conocimiento. Al mismo tiempo, servirá de apoyo para identificar los roles clave que impulsen la gestión del conocimiento y definir modelos de comportamientos deseados que deben ser asimilados por las personas que asumirán tales roles. En este sentido, se pretende impulsar una cultura alrededor del conocimiento que implica la asunción de perfiles comportamentales muy alineados con el valor del intercambio, la colaboración y la transferencia de lo que sabemos.

*Es preciso tener claro donde se encuentra este activo de conocimiento: nos centramos en las personas, no sólo internas del CSN, sino en todo el contexto externo afín al Consejo*

- **Tecnologías.** Una vez presentados los enfoques y ejes, se cuenta con una materia prima importante tanto para posicionar adecuadamente las tecnologías disponibles como para comprender qué cuestiones deberían cumplir nuevas herramientas. Así, cabe especificar las tecnologías disponibles o necesarias para conectar, ordenar, socializar o desarrollar y su especificidad hacia la gestión de la información externa, la comunicación interna, la gestión de contenidos, el conocimiento experto, la colaboración, el desarrollo de competencias, la mejora y la innovación.

En este sentido, cabe resaltar que la base tecnológica disponible en el CSN para apoyar la gestión del conocimiento es bastante extensa, presentando una desarrollada experiencia tanto en la configuración y uso de la web interna (intranet, en la que se ubican, por ejemplo, *blogs* y foros) como en la elaboración de soluciones propias vinculadas con la gestión de los procedimientos (sistema

*El modelo concentra su atención en tres aspectos: políticas, organización y tecnologías, con el objetivo de generar un clima y recursos favorables a la gestión del conocimiento*

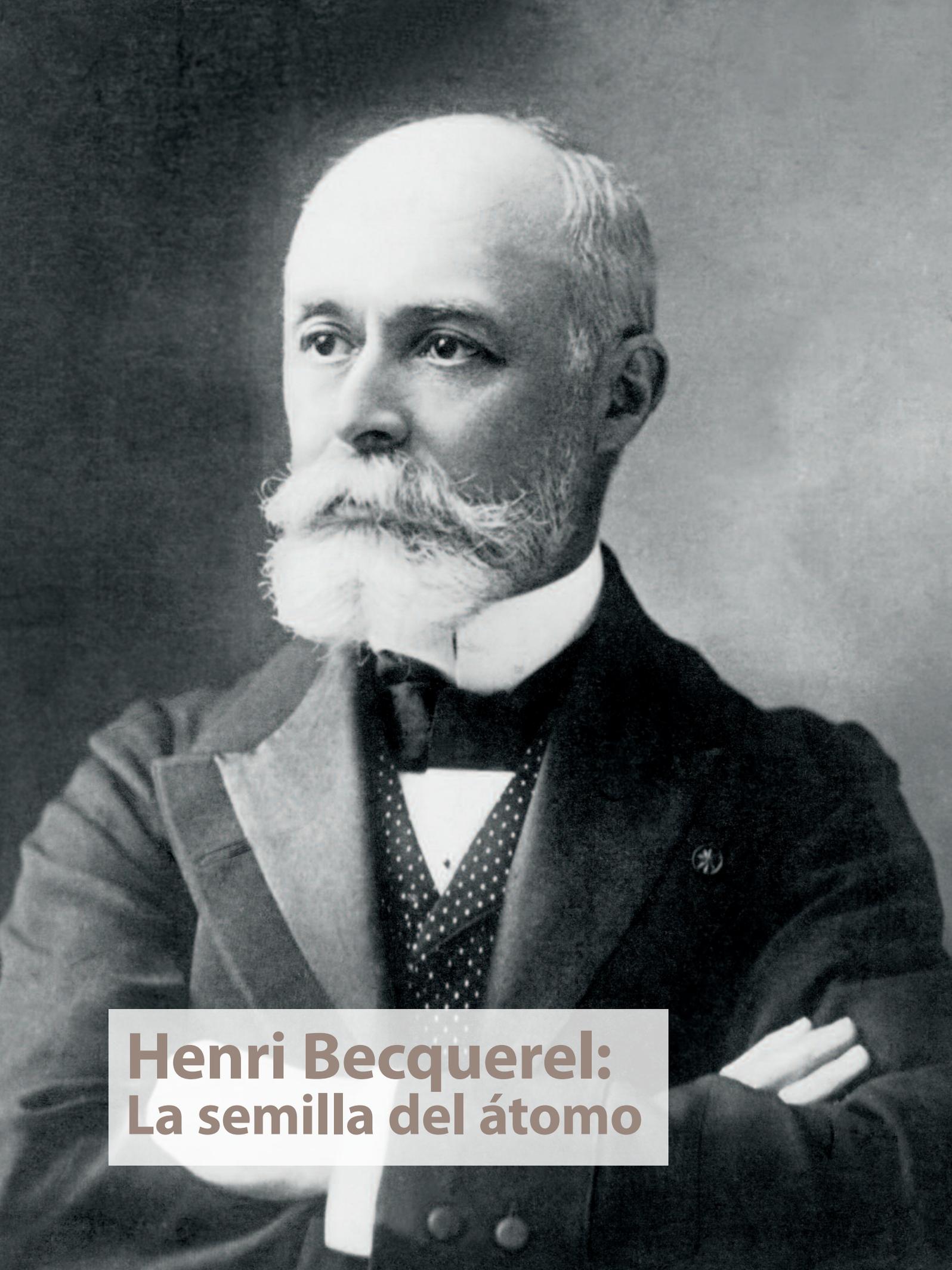
de gestión del CSN), lo que supone contar con aplicaciones como PROA en la que ordenar registros asociados a proyectos. Es más, como complemento claro a la gestión del conocimiento existe un sistema de gestión documental que permite el uso de un repositorio corporativo, actualmente en proceso de mejora. Finalmente, como entorno específico para la gestión del conocimiento se encuentra KITE, herramienta parametrizada inicialmente para la preservación del conocimiento y que podrá evolucionar en el acompañamiento a otros procesos de gestión del conocimiento en el CSN.

La gestión del conocimiento requiere un marco de métricas completo que se relaciona, en primer lugar, con los objetivos y resultados esperados que deben estar definidos en el parte inicial de ‘focos’ (figura 1) y para lo cual el CSN debe establecer claramente tales objetivos y, si existen, los resultados esperados (metas) previstos.

No obstante, es preciso medir otros aspectos clave que se derivan del propio modelo, por lo que hay que incluir métricas propias de la gestión del conocimiento que se vinculan con los enfoques “conectar, ordenar, socializar y desarrollar” y, específicamente, con los ocho ejes mencionados. Estos indicadores mostrarán la ‘calidad’ de los procesos de gestión del conocimiento establecidos.

Sobre todo en esta parte, hay que diferenciar indicadores de actividad (lo que hacemos), de conocimiento (lo que hemos construido e identificado), de impacto (lo que hemos conseguido).

También se deben añadir métricas vinculadas con el marco de soporte con el fin de evidenciar los resultados del apoyo que aportan los factores políticos, organizativos y tecnológicos al adecuado desarrollo de las actividades de gestión del conocimiento. De esta forma, el CSN debe particularizar un cuadro de indicadores para su gestión del conocimiento. 



**Henri Becquerel:  
La semilla del átomo**

Una constante que se repite esporádicamente en la historia de la ciencia es la que sitúa a la casualidad como elemento clave en la consecución de algunos descubrimientos. El hallazgo de la penicilina por Alexander Fleming sería el caso más conocido, pero el de la radiactividad por Henri Becquerel no le iría a la zaga. Estos casos parecerían señalar a algunos de los científicos más ilustres como

individuos afortunados que un buen día se encontraron sobre su mesa de trabajo con la llave hacia la gloria y el premio Nobel. Una línea de pensamiento según la cual cualquiera de sus colegas podría haber llegado a los mismos resultados de haber sido agraciado con idéntico golpe de suerte.

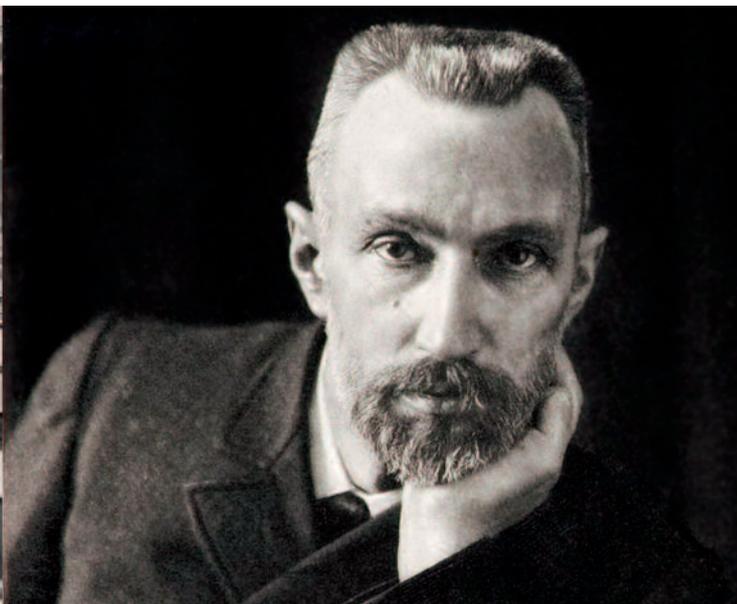
■ Texto **Vicente Fernández de Bobadilla** | Periodista ■

La realidad es un poco más compleja. Si bien este tipo de accidentes existen, es verdad también que tienden a ocurrirles a investigadores con una preparación sobresaliente, una dedicación de incontables horas de trabajo en laboratorio y el punto de genio necesario para darse cuenta de las posibilidades de ese hallazgo fortuito. Es exactamente el caso de Antoine Henri Becquerel, conocido como padre de la radiactividad, pero cuya carrera se extendió además por otros campos, lo suficientemente diversos como para dejar claro un talento fuera de lo común en la comunidad científica, pero no tanto en el entorno más cercano y personal, como fue el de su propia familia.

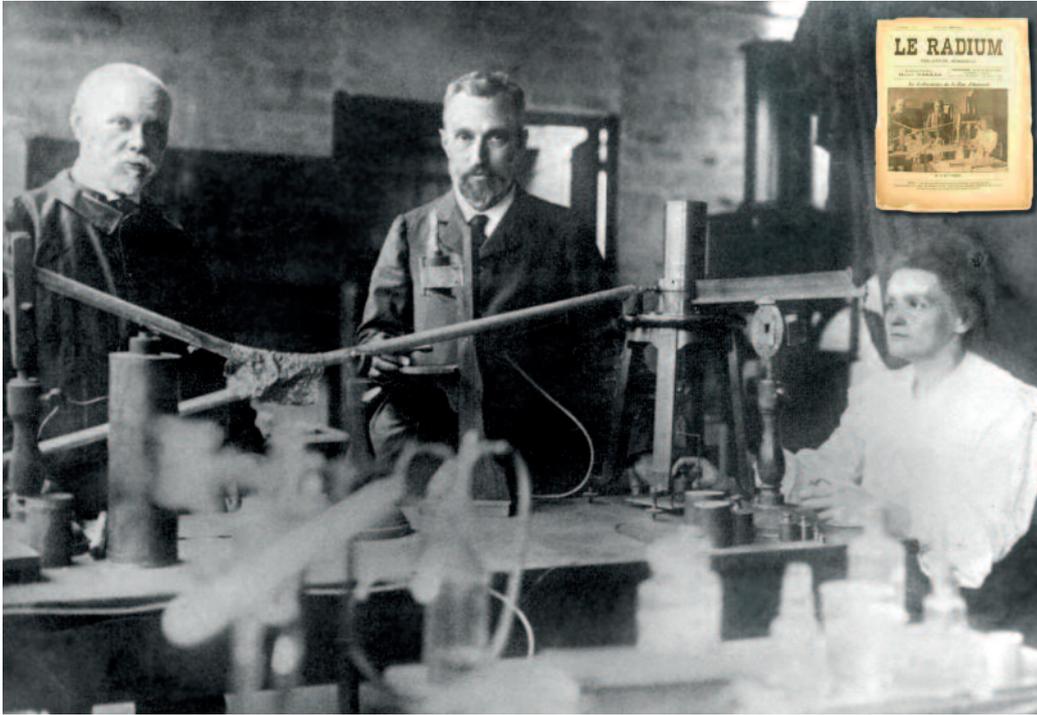
Cuando Henri Becquerel llegó al mundo, el 15 de diciembre de 1852 en París, hijo de Alexandre-Edmond Becquerel y Aurélie Quénard, la ciencia llevaba más de un siglo integrada en el código genético de sus ascendientes inmediatos. Su abuelo, Antoine Cesar Becquerel (1788-1878), fue descubridor de la piezoelectricidad –la carga eléctrica que se acumula en los cristales y otros materiales como resultado de la aplicación de presión mecánica– e inventor de un método electrolítico para la extracción del metal de los minerales, y su padre, Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891), era catedrático de física aplicada y entre sus campos de investigación se contaban la radiación solar y la

fosforescencia; fue, de hecho, el inventor del fosforoscopio, un aparato que permitía medir el tiempo que sigue brillando un material fosforescente después de que se le haya retirado la fuente de luz. No es sorprendente que el joven Henri no tuviera excesivas dudas sobre cuáles iban a ser sus pasos profesionales, si bien la sombra de los méritos de sus ancestros se mostraba, en principio, demasiado larga como para pensar que pudiera alcanzar su mismo nivel de excelencia.

Pero, ya desde el principio demostró estar a la altura: tras su paso por el Lycee Louis-Le-Grand de París, ingresó en la Escuela Politécnica, en 1872, y posteriormente en la Escuela de Puentes y Caminos, graduándose como ingeniero en



Estudió y se doctoró en Ciencias, en la Escuela Politécnica de París. En 1892, fue nombrado profesor del Museo de Historia Natural y en 1895 dio clases en la Escuela Politécnica de París. Su relación con el matemático Jules-Henri Poincaré le acercó a las investigaciones de Wilhelm Röntgen sobre los rayos X.



Durante sus investigaciones acerca de la fluorescencia descubrió accidentalmente lo que después se llamó radiactividad. Al principio estos rayos se denominaron rayos B, en su honor. En 1903, compartió el Premio Nobel de Física con Pierre y Marie Curie en reconocimiento por su descubrimiento de la radiactividad espontánea.

1877. El año anterior había ingresado en la Politécnica como profesor asistente, en el que sería el primero de muchos cargos académicos. Su tarea como ingeniero en el Departamento de Puentes y Caminos continuaría durante muchos años –de hecho, sería nombrado Ingeniero Jefe en 1894–, incluso cuando sus principales líneas de trabajo iban ya por otros derroteros. También trabajó como ayudante de su padre como profesor de Física Aplicada en el Departamento de Historia Natural de París. Y, en 1895, fue nombrado Catedrático en la Escuela Politécnica.

Si sus áreas de interés y capacidad de trabajo parecían inagotables, no se debía únicamente a su vocación, sino al intento de paliar el dolor de la tragedia en su vida personal; el 15 de enero de 1877 se casó con Lucie Marie Zoé Jamin, hija de Jules Célestin Jamin, uno de sus profesores en la Escuela Politécnica, y el 17 de febrero del año siguiente nacería su hijo Jean. Pero Lucie Marie no logró recuperarse de las complicaciones del parto y murió el

16 de marzo. A sus 26 años, Henri Becquerel se encontró viudo y padre de un niño de un mes.

Su familia y su trabajo le sirvieron de refugio en el peor momento de su vida. Su madre se ocupó de criar al pequeño Jean, mientras Henri se enfrascaba sin descanso aparente en diversas líneas de investigación. Como resultado de los años trabajando con su padre, la óptica fue uno de sus primeros campos de interés, pero, posteriormente, iniciaría su tra-

*Conocido como padre de la radiactividad, su carrera se extendió además por otros campos, para dejar claro un talento fuera de lo común en la comunidad científica*

bajo sobre la radiación de la luz, estudiando cómo los campos magnéticos influían en el plano de polarización, cómo la luz infrarroja producía fosforescencia en determinados materiales, y cómo los cristales absorbían luz, este último el tema de su tesis doctoral, presentada en 1888.

Nuevos cambios llegaron en 1890: el 2 de abril falleció Aurelie, que había cargado con la mayor parte de la responsabilidad de educar al pequeño Jean, ya de doce años de edad. Pero para entonces, Henri ya había conocido a Louise Désirée Lorieux, doce años menor que él, que el 14 de agosto de ese mismo año se convertiría en su segunda esposa. La pareja se instaló en el

domicilio familiar, pero decidieron mudarse al bulevar Saint-Germain tras la muerte del padre de Henri, que ocurrió nueve meses después. Una nueva vida, sin el apoyo de aquellos progenitores que tan decisivo había resultado en muchas ocasiones, y convertido de nuevo en marido y cabeza de familia, requería un nuevo escenario. Henri recibió de su padre una sustanciosa herencia, tanto económica como intelectual; la primera le libró de problemas monetarios durante toda su vida, y la segunda incluía las cátedras de Física en el Conservatorio Nacional de Artes y Medidas, y en el Museo Nacional de Historia Natural, complementadas con una ingente cantidad de recuerdos, documentos y papeles que recogían el avance de sus líneas de investigación, y algunos objetos de estudio: entre ellos, un compuesto de sales de uranio que Alexander había utilizado durante sus propios trabajos con la fosforescencia.

Becquerel publicó sus descubrimientos en varias revistas científicas, princi-

palmente en los *Annales de Physique et de Chimie* y en los *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Convertido ya en un científico cuya fama igualaba por lo menos a la de su padre y su abuelo, el resto de su vida podría haber transcurrido en una rutina de intenso trabajo sólo interrumpida por la recompensa de la excitación ocasional que provoca siempre una línea de investigación prometedora. Su labor pedagógica, en cambio, no alcanzó igual reconocimiento, ya que, aunque su autoridad en las materias que enseñaba era irreprochable, los estudiantes encontraban sus clases complicadas y difíciles de seguir; fallaba al transmitirles unos conceptos y razonamientos cuya asimilación le había facilitado su privilegiado entorno familiar.

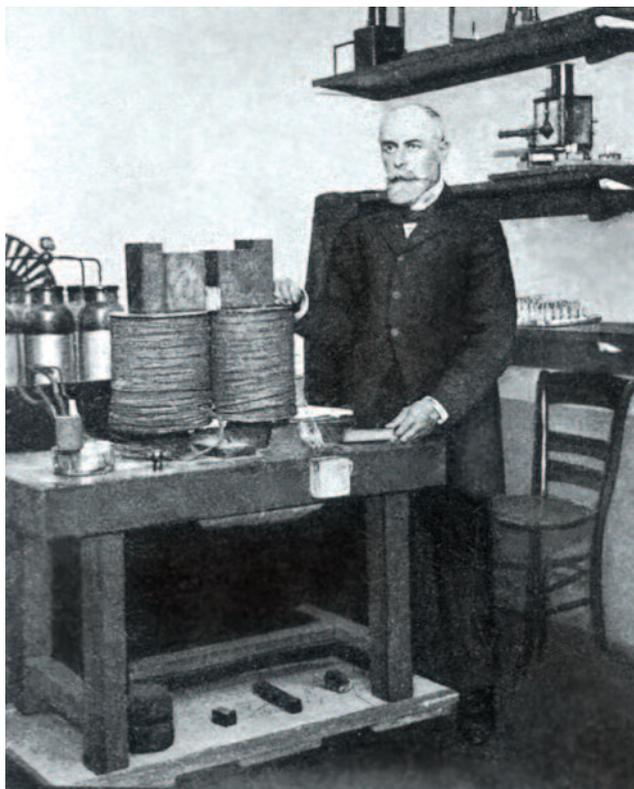
### Benditas casualidades

La serie de azares que lo cambiarían todo comenzó con una conferencia que el matemático Jules-Henri Poincaré ofreció en enero de 1896 en la Academia de Ciencias. El tema era una novedad difícil de creer incluso en unos tiempos de avances del conocimiento en los que todo parecía posible: los rayos X, descubiertos por el alemán Wilhelm Röntgen, que había enviado a Poincaré una carta y varias fotografías que mostraban la disposición de los huesos en el interior de una mano humana. Impresionado por el envío, Poincaré lo presentó en la Academia despertando el asombro en muchos y la curiosidad en Becquerel, que abandonó el edificio preguntándose si podría haber algún tipo de conexión entre aquellas imágenes y el fenómeno de la fosforescencia que su familia llevaba tanto tiempo estudiando.

El experimento que diseñó para ello reunía sus conocimientos de óptica y fotografía y sus

*La serie de azares que cambiarían la vida de Becquerel comenzó con una conferencia del matemático Poincaré, en enero de 1896, sobre una novedad difícil de creer: los rayos X*

años de estudio de la fosforescencia: consistía en exponer un material fluorescente a la luz solar y colocarlo luego, junto con un objeto metálico, sobre una placa fotográfica sin revelar. Si el material emitía rayos X, como resultado la imagen del objeto se mostraría en la placa. Los primeros intentos, con diversos compuestos fluorescentes, dieron como resultado una frustrante sucesión de fracasos: las placas no se velaban. Por fin, decidió recurrir a las sales de uranio que su padre había sin-



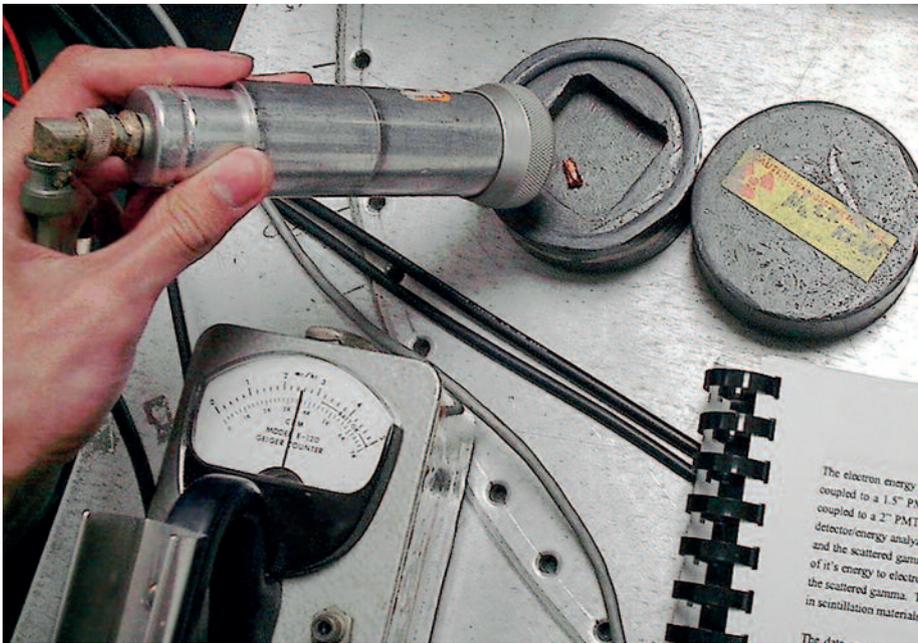
Becquerel, en su laboratorio. El científico también realizó investigaciones sobre la fosforescencia, la espectroscopia y la absorción de la luz.

tetizado años antes, concretamente el sulfato de uranio y potasio, y con una cruz de Malta como objeto a impresionar.

Todo estaba preparado, salvo el clima: el día en que iba a realizar el experimento amaneció nublado, al igual que los siguientes, hasta que Becquerel envolvió todos los materiales en una tela negra y los guardó en un cajón, esperando a jornadas más despejadas. Cuando, tres días después, volvió a sacarlos, se encontró con lo inesperado: la placa fotográfica no había estado expuesta a la luz en ningún momento y, sin embargo, mostraba una definida imagen de la cruz. La única respuesta posible era que la radiación procediera de las propias sales de uranio. Becquerel repitió el experimento en varias condiciones, ya dejada de lado la luz solar: volvió a colocar una sal de uranio sobre una placa fotográfica y también probó a colocar entre ambas una lámina de cristal, y una de aluminio. Probó con el mineral caliente y frío, pulverizado y disuelto en ácidos, sin que variara ni el resultado ni la intensidad de la radiación. Por fin, se decidió a anotar la conclusión en su diario: “Estoy convencido ahora de que las sales de uranio producen radiación invisible, incluso cuando se mantienen en la oscuridad”.

El 1 de marzo de 1896 Becquerel presentó su descubrimiento de la radiactividad espontánea en la Academia, y ni el mundo de la ciencia, ni su propia vida, fueron los mismos a partir de entonces. Buscando los rayos X, había encontrado en su lugar un nuevo campo de investigación al que se incorporarían científicos de todo el mundo, muy especialmente el matrimonio Curie, cuyo laboratorio estaba situado a unos cientos de metros del de Becquerel.

Un análisis apresurado de la historia podría hacer pensar que



En el Sistema Internacional de Unidades, a la unidad para medir la actividad radiactiva se llama becquerel. Además, en su honor también se han nombrado los cráteres Becquerel en la Luna y en Marte.

lo que hizo Becquerel fue poner la semilla de la radiactividad, y que Pierre y Marie Curie la cultivaron y extrajeron todo su fruto, encontrando actividad radiactiva en otros elementos como el torio, el polonio y el radio, pero ello no sería del todo exacto: más que competencia, entre los tres científicos hubo colaboración y apoyo mutuo –en su discurso del Nobel, Becquerel no olvidó recordar “las primeras muestras de polonio y radio que Monsieur y Madame Curie tuvieron la amabilidad de cederme”– y sus subsiguientes logros incluyeron, en 1899, el descubrimiento de que los rayos emitidos por el uranio podían ser deflectados

por un campo magnético, lo que sugería que la radiación contenía partículas con carga eléctrica; en 1899 y 1900 midió la deflexión de las partículas beta, y la relación carga/masa que obtuvo le permitió demostrar que la partícula beta era la misma que el electrón recientemente identificado por Joseph John Thomson; al año siguiente, constató que sus intentos de purificar el uranio daban como resultado un producto cada vez menos activo, lo que le hizo deducir que el mineral permanecía inactivo en estado puro, y que su actividad era provocada por la intervención de una impureza que se eliminaba progresivamente con la operación de purificación. Este último hallazgo fue la base de un descubrimiento similar que realizaría Ernest Rutherford en el torio, y que llevaría al desarrollo de la transmutación de los elementos a nivel subatómico.

Sí hubo una consecuencia del trabajo de los Curie, y muy especialmente de Marie, que afectó, literalmente, al

nombre de Becquerel. Porque durante los primeros años del descubrimiento, a falta de una definición más precisa y espoleados por la tendencia de la prensa de la época a la personalización espectacular, la radiación del uranio fue conocida popularmente como “los rayos de Becquerel”. Una tendencia que quedó cortada casi de raíz cuando el 18 de abril de 1898 Marie Curie presentaba el resultado de sus descubrimientos en la Academia de las Ciencias y acuñaba el término “radioactividad” para definir, desde ese momento y para siempre, el fenómeno.

Perder la mención de su nombre en favor de una definición mucho más exacta no tuvo que haber preocupado excesivamente a Becquerel, a pesar de los testimonios de la época que mostraban su propensión a la vanidad y su fuerte temperamento. Otros honores de mayor peso comenzaron a llegar: en 1900 se le concedió la Legión de Honor y la Royal Society británica le otorgó la prestigiosa medalla Rumford; al año siguiente, recibió la Medalla Helmholtz de la Academia de Ciencias y Humanidades Berling-Brandenberg. Faltaba el reconocimiento supremo, el premio Nobel, y este llegó en 1903, conjuntamente con el matrimonio Curie, y con la peculiaridad de que el premio compartido no se dividió en tres partes, sino en dos; una para Becquerel y otra para los Curie. Henri fue el único premiado presente en la ceremonia, ya que el matrimonio no pudo acudir por los problemas de salud de Marie. En aquellos años de trabajo inicial, los investigadores trabajaban con los materiales radiactivos sin protección alguna, desconocedores de sus efectos nocivos sobre el organismo, y algunos de ellos lo sufrieron en carne propia. Nunca se sabrá si la muerte en accidente de Pierre Curie le evitó sufrir la misma enfermedad que acabaría años después con la vida de su esposa, pero era obvio que los primeros síntomas ya se estaban presentando. Co-



Hace más de cien años del descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel, que fue una consecuencia del descubrimiento de los rayos X. Las implicaciones de ambos descubrimientos se extendieron hacia otras áreas de las actividades humanas, y singularmente a la medicina.

mo, con menor intensidad, se habían presentado también en el propio Becquerel.

El 3 de abril de 1901, mientras pronunciaba una conferencia, llevaba en un bolsillo de su chaleco un tubo sellado de vidrio que contenía algunos decigramos de una sal de uranio especialmente activa que Pierre Curie le había enviado. Posteriormente, Becquerel calcularía que había llevado encima ese tubo por alrededor de seis horas. Quince días después, descubrió una importante inflamación cutánea justo debajo de la zona del chaleco donde había guardado el tubo; la piel nunca se regeneró, quedando en ella una cicatriz imborrable. Los Curie, por su parte, estaban llegando por propia experiencia a conclusiones muy similares, y quienes trabajaban en el campo de los rayos X aprendieron pronto que la aparición de quemaduras era frecuente en su rutina profesional. El comienzo del siglo XX vio llegar las primeras investigaciones sobre las consecuencias que la radiación tenía sobre los tejidos, y las primeras búsquedas de sus aplicaciones en el campo de la medicina.

Becquerel nunca abandonó sus otras líneas de investigación, pero le faltó tiempo para desarrollarlas; tras una breve enfermedad, murió el 24 de agosto de 1908 a los 56 años de edad, en su casa de verano de Croisic. Aunque nunca se llegó a concretar la causa exacta de su muerte, es difícil no relacionarla con el frecuente manejo de elementos radiactivos.

Como único de los tres premiados en estar presente en la ceremonia de entrega del Nobel, Henri Becquerel no ahorró al matrimonio Curie el reconocimiento que se merecían al completar y complementar sus investigaciones. Pero tampoco olvidó nunca a las personas con las que realmente se sentía más en deuda: su padre

## Una dinastía excepcional

La actividad científica de los Becquerel se extiende durante más de un siglo y medio, desde el nacimiento de Antoine César, en 1788, hasta la muerte de Jean, en 1953. Los numerosos logros de Antoine César abarcaron los campos de la electricidad, la óptica, fluorescencia, electroquímica, fertilizantes y meteorología; la Cátedra de Físicas del Museo de Historia Natural, que heredarían sus descendientes, fue creada específicamente para él. Y aún tuvo tiempo para dedicarse a la política y ejercer como alcalde de Loiroit. Su hijo Alexandre Edmond siguió sus pasos, trabajando como ayudante de su padre y publicando conjuntamente con él. Su labor abarcaría los campos de la pirometría, electroquímica, magnetismo y los efectos químicos de la luz.

El cuarto Becquerel fue Jean, el único hijo de Henri, que continuó con la tradición familiar, ingresando en la Escuela Politécnica y sucediendo a su padre en la Escuela de Puentes y Caminos y en la Cátedra de Física del Museo. Trabajó también en las propiedades ópticas y magnéticas de los cristales y estableció una evidencia clara de la polarización rotatoria. Como su padre murió repentinamente en su casa de verano, de un ataque al corazón el 4 de julio de 1953. Al no tener descendencia, su fallecimiento puso punto final a la presencia de los Becquerel en la historia de la ciencia. ▶



y su abuelo, que abrieron nuevas sendas de conocimiento en los campos de la ciencia y fomentaron en el tercer Becquerel una formación y una vocación que le pusieron en el camino del premio Nobel. “Si mi padre hubiera vivido en 1896”, llegó a declarar, “él habría descubierto la radiactividad, sin ninguna duda”. El becquerel –o becquerelio– es hoy el nombre de la unidad de medición de la actividad

radiactiva, establecida en una desintegración nuclear por segundo; fue llamada así, lógicamente, en honor a Henri, pero es fácil imaginarse que una parte de ese honor corresponde también a sus antecesores; una unidad de medida, después de todo, puede honrar a una familia dedicada a la excelencia científica con más merecimiento y precisión que cualquier otra opción de monumento. ◉

# Gestión y clasificación de los residuos radiactivos de baja y media actividad

■ Texto **Julia López de la Higuera** | Jefa de Área de Residuos de Baja y Media Actividad | ■

La gestión de los residuos radiactivos comprende todas las actividades necesarias desde que se generan hasta que se almacenan de forma definitiva (gestión final), incluyendo todas las operaciones intermedias de manejo, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento temporal y transporte.

De acuerdo con las opciones de gestión final de los residuos radiactivos adoptadas en España, se denominan residuos radiactivos de baja y media actividad de periodo corto y medio (RBMA) aquellos cuya actividad se debe principalmente a que contienen radionucleidos de periodo de semidesintegración inferior o igual a 30 años, y cuyo contenido en radionucleidos de periodo más largo es muy bajo y se encuentra limitado. La actividad másica de los radionucleidos se sitúa en general entre algunas decenas de Bq/g (bequerelios por gramo) y valores del orden de  $10^7$  Bq/g.

Para la gestión final de estos residuos es necesario que se confinen y aislen de manera controlada del entorno humano durante algunos cientos de años, tiempo necesario para que su radiactividad decaiga suficientemente y no se produzca un impacto radiológico inaceptable para las personas y el medio ambiente. Estos objetivos pueden conseguirse en los almacenamientos definitivos (finales) construidos cerca de la superficie terrestre, como es el de El Cabril.

Se ha definido también una subcategoría de este tipo de residuos, denominada

residuos de muy baja actividad de periodo corto o medio (RBBA), que disponen de una gestión final diferenciada y una tecnología de almacenamiento definitivo propia en el centro de El Cabril, adecuada al menor riesgo radiológico que suponen.

La seguridad de los almacenamientos definitivos construidos cerca de la superficie terrestre, como el de El Ca-

*Se denominan residuos radiactivos de baja y media actividad de periodo corto y medio (RBMA) aquellos cuya actividad se debe a que contienen principalmente radionucleidos de periodo de semidesintegración inferior o igual a 30 años*

bril, está basada en la existencia de barreras, que son medios naturales o artificiales interpuestos entre la radiactividad y el entorno humano, para confinar y retardar la posible salida de los elementos radiactivos. Se establecen generalmente tres barreras de seguridad: la primera es el acondicionamiento de los residuos, la segunda son las estructuras de ingeniería construidas y la tercera barrera es el medio geológico natural circundante, que retendrá en caso necesario los isótopos

radiactivos para garantizar que el impacto radiológico sea aceptable.

Los residuos radiactivos de baja y media actividad (periodo corto o medio) se originan, fundamentalmente, en la operación y en el desmantelamiento de las centrales nucleares y otras instalaciones nucleares. En las instalaciones radiactivas se generan también pequeñas cantidades en las aplicaciones médicas e industriales que utilizan materiales radiactivos.

## Almacenamiento definitivo

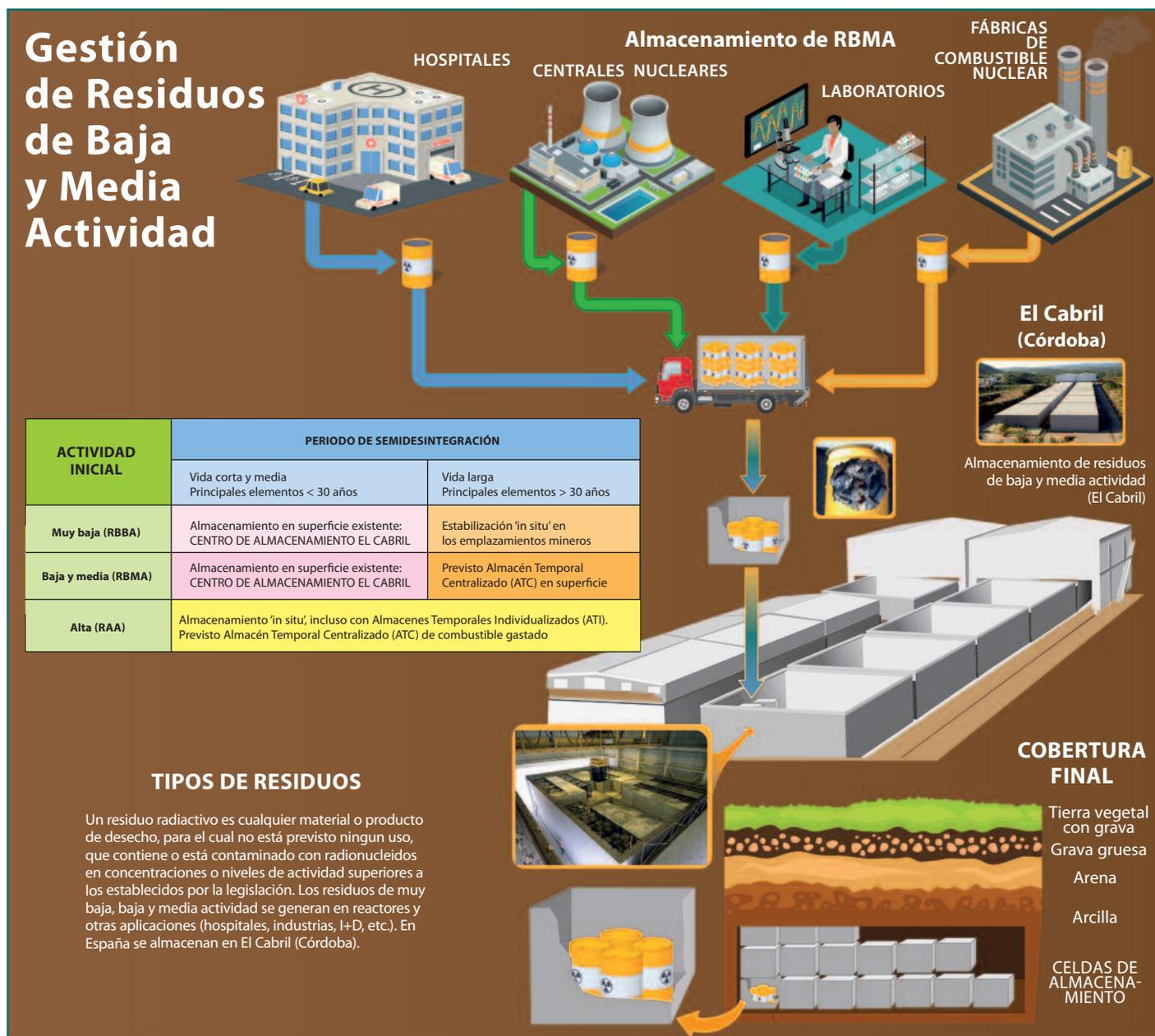
Una vez generados, estos residuos radiactivos se someten a diversos tratamientos (filtración, compactación, secado, etc.), en función de su naturaleza (residuos metálicos, plásticos, grasas, textiles, sólidos húmedos) y del acondicionamiento posterior que vayan a recibir. Esta última fase de acondicionamiento transforma el residuo radiactivo en un producto final aceptable para su almacenamiento definitivo en El Cabril, y que por tanto cumple con los criterios de aceptación en esta instalación.

Los criterios de aceptación de los residuos en el almacenamiento El Cabril constituyen un documento oficial de explotación de esta instalación y su objetivo es contribuir a la garantía de la seguridad durante la etapa de operación y en el largo plazo. Son un conjunto de limitaciones en relación con las características físico químicas de los residuos y con su actividad másica. Además, in-

cluyen las pruebas a las que debe someterse cada bulto-tipo antes de ser aceptado, entre las que se encuentran la resistencia mecánica, los ensayos de lixiviación, los ensayos de ciclos térmicos, etcétera, y los criterios para valorar los resultados obtenidos en cada caso. Los productores de residuos están obligados a cumplir los criterios de aceptación en El Cabril y deben garantizar que tienen la capacidad necesaria para acondicionar los bultos de residuos con la calidad requerida.

Por su parte, Enresa, como titular del almacenamiento de El Cabril, debe garantizar que solo se almacenarán en esta instalación bultos de residuos que cumplan con los criterios de aceptación. Para ello, está implantada una metodología que implica la realización de un proceso específico de aceptación para cada bulto-tipo de residuos antes de que se inicie su acondicionamiento por el productor. Tras los ensayos y pruebas en cada bulto tipo, y siempre que los resultados sean satisfactorios, se produce la

aceptación en El Cabril. Posteriormente, se realizan por Enresa controles periódicos en la recepción de los bultos de residuos, auditorías a los productores, exámenes documentales y en campo sobre el acondicionamiento de los residuos y ensayos de verificación programados para comprobar que se mantiene la calidad de los bultos que se almacenan en El Cabril. El proceso de aceptación y las actividades de control periódico posteriores son objeto de evaluación e inspección por el CSN.



A  
O  
K  
M  
2

2E  
EF  
FF  
SS  
25  
ES  
15  
11  
11  
21

Medicina nuclear

# Revolución permanente en la lucha contra el cáncer

El uso de isótopos radioactivos para el diagnóstico y tratamiento de patologías ha cambiado la forma en la que nos enfrentamos al cáncer. Hablamos de la medicina nuclear, un campo con décadas de historia que hoy trabaja para ser cada vez más efectiva e inocua. Buena prueba del éxito de la

medicina nuclear está en su relevancia clínica actual: se calcula que una de cada dos personas se beneficiará de ella a lo largo de su vida.

■ Texto Sergio Ferrer | Periodista | ■



A finales de la década de los cuarenta, el doctor Carlos Blanco Soler mostró interés en las posibilidades de un nuevo campo: la medicina nuclear. En 1949, junto con otros colaboradores del Hospital de la Cruz Roja de Madrid, importó desde Reino Unido un detector de radiaciones y yodo-131. El objetivo era diagnosticar y tratar enfermedades tiroideas. En septiembre de ese mismo año, un paciente con hipertiroidismo era inoculado con el isótopo radioactivo, y, casi 60 años después, el desarrollo de nuevos equipos y radiofármacos ha revolucionado especialidades como la oncología.

Pero, ¿en qué consiste la ‘medicina nuclear’? Este es el nombre que recibe la rama de la medicina que emplea pequeñas cantidades de material radiactivo para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Para conseguirlo, usa radioisótopos, como flúor-18 y carbono-11, a un fármaco que lo transporta al interior del cuerpo a través del torrente sanguíneo. Este radiofármaco recorre el organismo hasta alcanzar el órgano de interés, donde es

‘fotografiado’ por un detector de radiación. El resultado final es una imagen que muestra cómo funciona la estructura... y qué falla en ella.

La medicina nuclear fue conocida hasta los años 50 como ‘medicina ató-

*En lugar de ver lo que ocurre dentro de células y tejidos, la medicina nuclear permite echar un vistazo a lo que sucede en las moléculas de esas células*

mica’. Hoy se la conoce también como ‘imagen molecular’. El director de medicina nuclear de la Clínica Universidad de Navarra, José Ángel Richter, explica sus bases: “En lugar de atravesar al paciente con un rayo X o un campo magnético para ver estructuras anatómicas, usamos fármacos marcados para

ver la actividad metabólica de los procesos”.

En otras palabras, en vez de ver lo que ocurre dentro de células y tejidos, la medicina nuclear nos permite echar un vistazo a lo que sucede en las moléculas de esas células. En España se pusieron en marcha los primeros centros de medicina nuclear en la década de los cincuenta y hoy existen unas 150 unidades de esta especialidad, que al año llevan a cabo 700.000 diagnósticos y 30.000 aplicaciones terapéuticas.

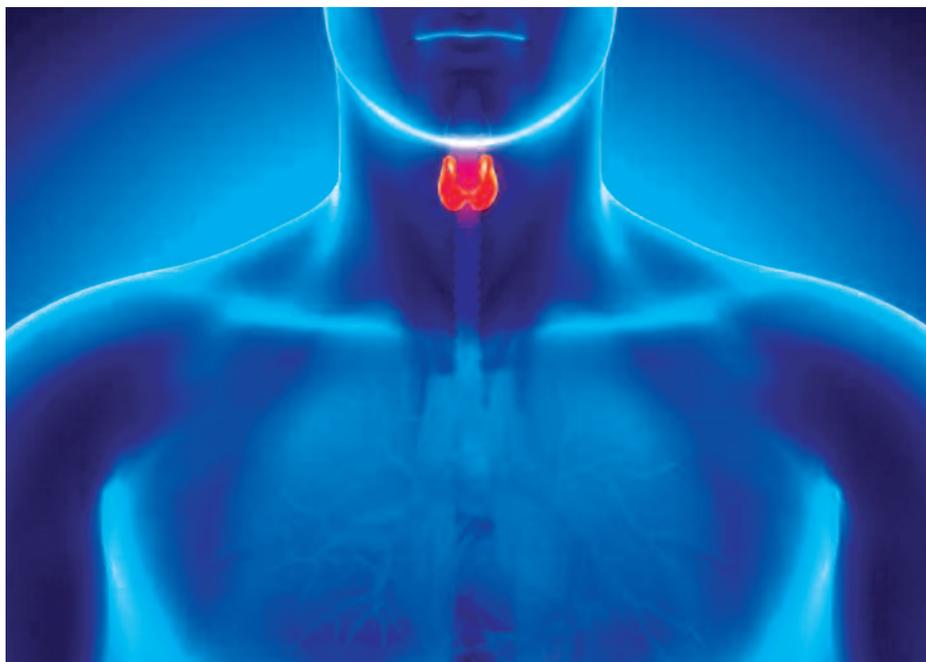
### ¿Diagnóstico o tratamiento?

Cada tipo de célula tiene en su membrana una serie de receptores, ‘cerraduras’ en las que solo encaja un tipo de ‘llave’. La medicina nuclear aprovecha estas diferencias para unir a la célula de interés el material radiactivo que nos permitirá verla o, si es cancerígena, matarla. El radiofármaco se inyecta en el torrente sanguíneo y va circulando por el organismo: cada vez que pasa por el órgano en cuestión se fija poco a poco en esa parte. El material radiactivo varía según se busque el diagnóstico o el tratamiento. “Para el diagnóstico se usan isótopos radioactivos de muy baja energía, normalmente gamma”, explica el presidente de la Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (SEMNUM) y médico del Hospital Universitario Reina Sofía (Córdoba), Juan Antonio Vallejo.

Si lo que queremos es tratar al paciente la estrategia es similar. En este caso, el isótopo que ‘mandamos’ a la célula “es una emisión beta negativa en forma de electrones o una emisión alfa en forma de partículas grandes que dañen a la célula”. La finalidad es la misma: radiar solo a la célula que queremos eliminar. Así lesionaremos su ADN, generando radicales libres que terminen por destruirla.

### Marcando células con gammagrafía

La técnica de diagnóstico convencional en medicina nuclear es la ‘gammagrafía’,



Cada célula posee en su membrana una serie de receptores, una especie de cerradura que solo abre una llave determinada. La medicina nuclear aprovecha esta diferencia para unir a la célula el material radiactivo que permita verla.

cuyo primer escáner con cristal de centelleo de yoduro sódico se fabricó en 1951. Hoy en día ha evolucionado hasta recibir el nombre de *Single Photon Emission Computed Tomography* (Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica, SPECT por sus siglas en inglés). Como su nombre indica, utiliza la radiación gamma emitida por el isótopo radiactivo para obtener una imagen del paciente. “Existe una gran diversidad de procedimientos con esta técnica”, dice Richter. “Es muy importante para el estudio de la función de órganos como el riñón, estructuras anatómicas como el esqueleto y el aparato digestivo”.

El marcaje de células es otra posibilidad que nos ofrece la gammagrafía convencional. De esta forma, el médico puede ver cómo leucocitos, plaquetas, hematíes y otros tipos de célula se comportan dentro de una persona, ya sea de una forma normal o patológica. “Hay pacientes que tienen trastornos en estas células y, de esta forma, podemos ver si se están produciendo en alguna zona concreta del cuerpo”, añade Richter.

El nacimiento de la gammagrafía supuso un gran avance para la medicina nuclear. Antes de que llegaran técnicas más modernas, el número de exploraciones anuales que se llevaban a cabo en España con estos métodos era de 1.750.000, según los datos de Richter. Pero, lo mejor estaba todavía por llegar.

### Y entonces llegó el PET

La revolución para la medicina nuclear llegó, en opinión de Richter y Vallejo, con el desarrollo del PET (del inglés *Positron Emission Tomography*, tomografía por emisión de positrones). Esta técnica ofrece unas imágenes de muy alta calidad. También permite el desarrollo de nuevos radiofármacos con isótopos como el carbono, el flúor y el nitrógeno, presentes en cualquier molécula.

Richter compara la relevancia del PET



Los radiofármacos se emplean para diferentes patologías. Colon, mama, cerebro o próstata disponen de su composición específica.

con la “revolución” que supuso el TAC (Tomografía Axial Computarizada) en el campo de la radiología. También con la aparición de las imágenes por resonancia magnética (IRM). “El gran avance para la medicina nuclear ha sido el PET, una herramienta que ha transformado muchos conceptos en oncología y neurología”, defiende. El médico sabe de lo que habla, pues estudió la tecnología PET en el hospital Hammersmith de Londres (Reino Unido), en 1988, con la intención de traer a España una tecnología que por entonces todavía era recién nacida. Entre 1995 y 1996 se instalaron las primeras máquinas en su clínica, así como en la Universidad Complutense de Madrid. La medicina nuclear estaba a punto de alcanzar el siglo XXI en nuestro país.

“En aquel momento, nadie entendía lo que era el PET: todo estaba basado en el TAC y en la resonancia”, recuerda Richter. No fue hasta que se vieron los primeros resultados cuando los clínicos “dieron sus

bendiciones” a la nueva técnica, hoy convertida en “imprescindible”. El PET ha mejorado el diagnóstico del cáncer y de patologías neurológicas como las demencias y el párkinson. A principios de 2010, según datos de la SEMNIM, 70 unidades de medicina nuclear en España contaban con equipos PET o PET-TAC. Cada año se llevan a cabo unos 60.000 procedimientos diagnósticos con esta técnica.

### Para detectar corazones rotos

La oncología y la neurología no son las únicas especialidades que se han beneficiado del despertar de la medicina nuclear. El médico especialista del Hospital Universitario Vall d’Hebrón de Barcelona Santiago Agudé cuenta con más de 30 años de experiencia en otro campo: el de la cardiología nuclear. Agudé explica que esta rama de la medicina nuclear, que de momento se utiliza solo para diagnóstico, es más compleja que la relacionada con la oncología: “Es necesario que tres especia-

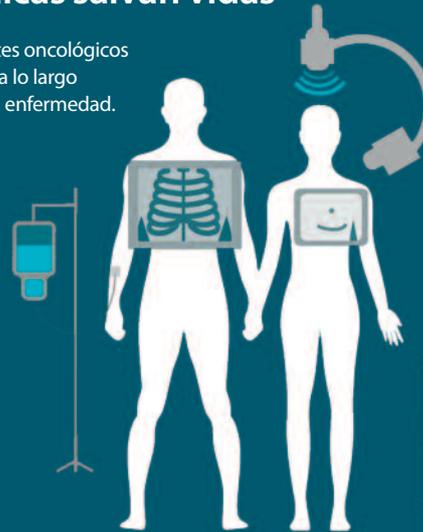
# MEDICINA NUCLEAR Y RADIACIONES IONIZANTES

## Las aplicaciones nucleares médicas salvan vidas

-  Oncología
-  Cardiología
-  Neurología
-  Neumología
-  Pediatría

**70%** El 70% de los pacientes oncológicos reciben radioterapia a lo largo de la evolución de su enfermedad.

**80%** Un 80% del diagnóstico médico se basa en pruebas de imagen.



**93%** Con un diagnóstico precoz, la mamografía alcanza tasas de control de hasta un 93% y aumenta la calidad diagnóstica.

### Las cifras en España

**Radiodiagnóstico**  
35.500 instalaciones,  
34 millones de exploraciones anuales.

**Medicina nuclear**  
187 instalaciones, 900.000 exploraciones.

**Radioterapia**  
155 instalaciones, 100.000 tratamientos de radioterapia externa y 2.500 de braquiterapia.



**80%** Hasta un 80% de respuestas favorables del tratamiento de tumores de difícil extirpación, mediante inyección de microesferas marcadas de Itrio 90.

### Las cifras en el mundo



**30 millones** de personas en todo el mundo se benefician de la medicina nuclear para diagnóstico o tratamiento.

**60 patologías** se pueden diagnosticar y tratar mediante técnicas de medicina nuclear.

## SPECT-TAC Permite obtener imágenes gammagráficas en 3D, unidas a la información anatómica de alta resolución

 **MAYOR RAPIDEZ**  
Reduce el tiempo de exploración un 50%.

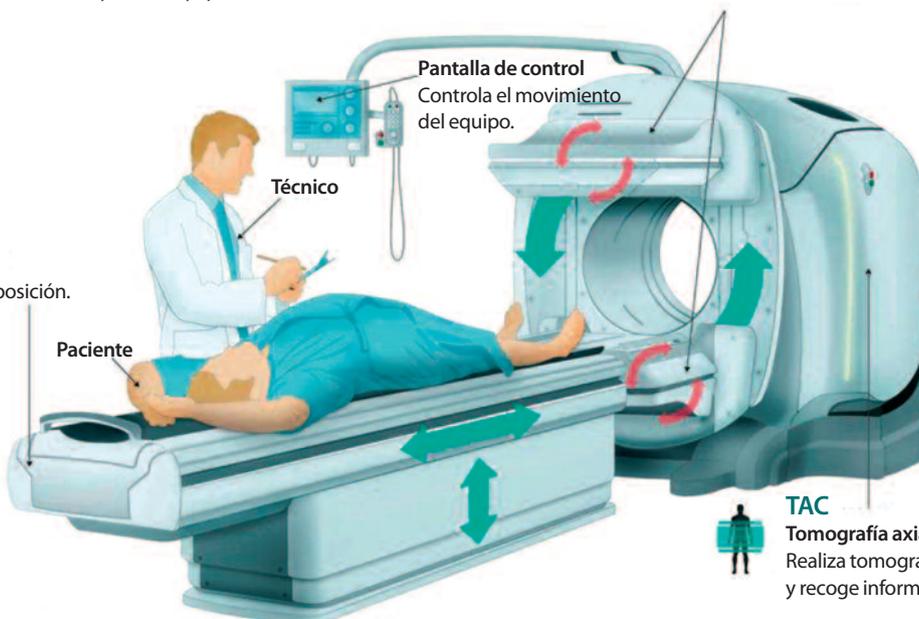
 **MENOR RADIACIÓN**  
Reduce en un 50% la dosis de radiación que recibe el paciente.

 **SPECT**  
**Tomografía computarizada de emisión de fotón único**  
Recoge información del radiofármaco inyectado.

 **DIAGNÓSTICO MEJORADO**  
Gran mejora diagnóstica respecto a equipos convencionales.

 Giro autónomo e independiente.

**Mesa de exploración**  
Regulable en altura y posición.



### ASÍ FUNCIONA EL SISTEMA SPECT-TAC

1. Inyección del radiofármaco (tecnecio)
2. El SPECT toma imágenes 3D de la distribución del radiofármaco en el órgano de estudio
3. El TAC toma imágenes 3D de la anatomía del paciente

 **TAC**  
**Tomografía axial computarizada**  
Realiza tomografía de 16 cortes y recoge información anatómica.

listas trabajen juntos: un cardiólogo, un radiólogo y un médico nuclear”. Este factor, sumado a la falta de equipos, radiofármacos adecuados y profesionales especializados es la que hace, en su opinión, que la cardiología nuclear no haya explotado todo su potencial, al menos en España.

Un potencial que no se debería desdeñar, pues el PET también ha tenido un gran impacto en este campo. La endocarditis protésica (infección que se produce en una prótesis que sustituye a una válvula cardíaca del corazón) se puede diagnosticar mediante una ecocardiografía transesofágica, cuya sensibilidad a la hora de detectar la patología es, según Aguadé, “de menos del 60 por ciento”. En cambio, el éxito diagnóstico al utilizar el PET “es de un 95 por ciento”.

El PET también se utiliza en cardiología nuclear para analizar a pacientes con

infartos extensos y decidir si hay que revascularizarlo o no. Aguadé asegura que, para esta detección de miocardio viable, el PET es la técnica “más sensible”.

Pero, no solo de PET vive la cardiología nuclear. Aquí la gammagrafía se utiliza como “SPECT de perfusión miocárdica”, un test de provocación de isquemia para diagnosticar la angina de pecho. “Esta es la prueba más utilizada, nosotros hacemos más de 1.500 al año”, dice el médico catalán. El motivo, según explica, es que la técnica está “toda automatizada”. Esto permite que un programa informático procese la imagen, cuando en otras técnicas como la ecocardiografía, la calidad del resultado depende “completamente” de la del operador.

A pesar de todo, la cardiología nuclear se enfrenta a varias limitaciones en nuestro país. “No hay gammacámaras cardio-

lógicas dedicadas, ni tampoco nadie dedicado en exclusiva a esta especialidad”, lamenta Aguadé. “También faltan radiofármacos de perfusión miocárdica asequibles para PET”, una prueba que por este motivo no se puede hacer en España. Para hacerla, habría que viajar hasta EE.UU.

### Un acelerador de partículas

Llegados a este punto habrá quedado claro que los radiofármacos son la herramienta fundamental de la medicina nuclear, pues permiten obtener la información diagnóstica. Richter comenta que existen dos tipos: los convencionales con isótopos de emisión gamma para las gammagrafías, y los emisores de positrones que emplean los estudios PET. Encontrar nuevas moléculas marcadas con interés diagnóstico o para el tratamiento es una búsqueda sin fin para los investi-

## Oiga doctor, pero ¿todo esto es seguro?

El lector podría preguntarse sobre la seguridad de introducir elementos radioactivos en nuestro organismo. Richter nos tranquiliza: “Trabajamos mucho en la protección radiológica, no queremos que al paciente se le irradie más de lo que se debe”. El doctor asegura que la irradiación, aunque mínima, es imprescindible, pero que la optimización de las técnicas existentes ha reducido “considerablemente” el nivel de radiación si lo comparamos con el de hace años. En este sentido, José Ángel Richter alaba el desarrollo de los nuevos equipos. Al ser más sensibles, con menos dosis de radiación se obtiene “la misma o más” información del paciente. Buena prueba del éxito de la medicina nuclear está en su relevancia clínica actual: se calcula que uno de cada dos personas se beneficiará de ella a lo largo de su vida, según datos del Foro Nuclear.

“Hay un crecimiento exponencial en el uso de la medicina nuclear como terapia”, asegura Vallejo. Según este especialista, esto es debido precisamente a que estas técnicas, que “tienen muy pocos efectos secundarios” en comparación con la quimioterapia: “Conseguimos no solo curar, sino mejorar la vida de los pacientes”. Además,

defiende que la relación entre coste y eficiencia es “muy alta”, un punto que cada vez tiene más importancia en medicina.

¿Hacia dónde nos llevará la medicina nuclear en el futuro? Los médicos consultados piensan que en los próximos años tendrá una importancia capital a la hora de entender cómo de extendido está un tumor, dónde está localizado y cómo responde a la medicación. “Hoy en día ya no se esperan meses para ver cómo responde el cáncer a un tratamiento, bastan días”, asegura Richter. Esto es posible porque las técnicas presentadas en este artículo detectan los cambios moleculares que tienen lugar en el tumor como consecuencia del tratamiento, lo que hace que este sea más eficaz y precoz.

Richter se despide con una frase que escuchó decir a un compañero: “No hay nada más caro en la sanidad que la ignorancia”. Es una afirmación que el médico comparte: “Si no conocemos bien una enfermedad, daremos tratamientos incorrectos que no servirán para nada, solo para gastar dinero. El conocimiento nos permitirá ser más precisos y mejorar el tratamiento de los pacientes”. La medicina nuclear es, ante todo, ese conocimiento. ▀

gadores. El marcaje con galio es uno de los últimos ejemplos: “Ofrece marcadores muy interesantes en tumores neuroendocrinos y de próstata”, comenta José Ángel Richter.

El problema de los isótopos utilizados en PET es que su vida media es muy corta, de apenas unos minutos. En otras palabras: no es posible traerlos de fuera como en el caso de otros fármacos sino que hay que producirlos en el momento. Y crear radioisótopos no es algo sencillo: “Es un problema logístico que necesita inversión, investigación y el apoyo de la industria farmacéutica”, dice Vallejo.

El servicio de medicina nuclear de

*Crear radioisótopos no es algo sencillo: necesita inversión, investigación y el apoyo de la industria farmacéutica*

Richter es uno de los 17 de España que cuentan con un ciclotrón, un acelerador de partículas al servicio de la medicina. Es una máquina muy cara que, además, ne-

cesita de personal especializado para su manejo. Las ventajas que ofrece a cambio son claras: “Nos ha permitido desarrollar radiofármacos que antes no se conocían ni aplicaban”, dice el médico. Por ejemplo el carbono 11, cuya vida media de 20 minutos obliga a aplicarlo con rapidez.

Hoy, la unidad de Richter cuenta con 22 radiofármacos que emplean tanto en clínica como investigación. Pero, ¿de verdad hacen falta tantos? “El metabolismo humano es muy complejo. Diversos tumores crecen por diversos motivos”, aclara el doctor. Esto quiere decir que el radiofármaco a emplear variará según lo que deseemos saber: cada patología tiene uno óptimo. “Si quiero ver la multiplicación de células de un tumor utilizo timidina, un nucleótido del ADN. Si quiero ver un tumor en el cerebro utilizo un aminoácido, la metionina”. Colon, mama, cerebro, próstata... cada tumor tiene un radiofármaco adecuado. Algo similar sucede con la neurología, según necesitemos ver el metabolismo de las neuronas, los depósitos de amiloides del cerebro o el metabolismo del sistema nigroestriado implicado en el párkinson.

**Dos en uno: equipos multimodales**

Los radiofármacos no son el único aspecto de la medicina nuclear en constante evolución. Si estos son los elementos que nos permiten obtener datos del paciente, el otro pilar de este campo son los propios equipos que detectan esa información. “Son sondas que pueden ser muy sencillas o muy complejas, desde gammacámaras a la tecnología PET de los últimos años”, explica Richter.

La última tendencia en este sentido son los ‘equipos multimodales’, un baile de siglas con un único fin: conseguir toda la información posible sobre lo que pasa en el interior del paciente. Richter explica su importancia: “En medicina las enfermedades se conocen por los cambios anatómicos, histológicos y metabólicos que

## CÓMO FUNCIONA EN EL CUERPO EL TRATAMIENTO DE ENERGÍA NUCLEAR

**Las personas que padecen de cáncer de tiroides se tienen que someter a un tratamiento de dos aplicaciones; cada año pasan por un proceso de evaluación y diagnóstico para localizar si hay residuos cancerígenos y aplicar la segunda dosis. El tratamiento dura de tres a cinco años.**

- 1) Cirugía:** Se quita la glándula tiroidea.
- 2) Se inyecta en el torrente sanguíneo el tratamiento con yodo radiactivo que localiza las células de la glándula.**
- 3) El radiactivo destruye completamente las células de la glándula.**
- 4) Anualmente, el paciente está en revisión. Si el médico encuentra residuos cancerígenos aplica la segunda dosis del radiactivo.**

provocan. Para entender bien una patología es necesario tener la información de uno, dos o incluso tres de los factores”.

Es aquí donde entran en juego los equipos multimodales, que permiten obtener en una misma exploración la información anatómica y molecular del paciente. Por ejemplo, las técnicas se han ‘fusionado’ con la tomografía computada (CT, del inglés ‘computed tomography’) para dar lugar al PET-CT y al SPECT-CT.

### El futuro de la medicina nuclear

La medicina nuclear no es nueva pero, aunque el PET supuso una revolución, no significa que haya llegado a su cenit. Uno de los últimos términos incorporados a este campo es el de la ‘teragnosis’ (del latín: ‘tera, tratamiento; gnosis, conocimiento). “Hoy en día muchas de las técnicas que se usan para diagnósticos se pueden aplicar también por la línea terapéutica”, aclara Richter. Vallejo, por su parte, considera la aplicación terapéutica de estas técnicas “la vía fundamental” en el desarrollo actual de este campo.

El objetivo de la teragnosis es lograr diagnóstico y tratamiento con la misma molécula en dos fases distintas. “Primero hago el diagnóstico con un isótopo para detectar la enfermedad y saber que puedo ‘verla’ con esa molécula y luego utilizo esa misma molécula con un isótopo terapéutico”, comenta Richter. “Lo único que cambia es el isótopo: uno de baja energía y otro más ‘agresivo’ para cargarse la célula”, aclara Vallejo. Un ‘dos por uno’ con el que el paciente puede beneficiarse de las dos caras de la medicina molecular.

En los últimos años se ha hablado mucho de la genómica y la proteómica. Más joven es la ‘radiómica’, un nuevo campo de estudio todavía en vías de investigación. Esta permitirá cuantificar las imágenes obtenidas a través de nuevos *softwares* más sensibles. El resultado, será obtener una información mucho más rica y precisa de las patologías. Una canti-



Las imágenes PET utilizadas en medicina nuclear no solo se emplean en tratamientos clínicos, también se estudian en la investigación básica.

dad de datos que hará que los que se obtienen hoy en día queden superados.

La faceta terapéutica de la medicina nuclear se centra en la oncología, pero no excluye otras enfermedades como el hipertiroidismo e incluso algunas patologías articulares. Juan Antonio Vallejo médico del Hospital Universitario Reina Sofía de Córdoba, Juan Antonio Vallejo, adelanta los próximos años: “Habrá nuevas dianas terapéuticas, por ejemplo en cáncer de próstata, donde el trazador PCNA va a cambiar el escenario de esta enfermedad”. También explica que se está trabajando con nuevos receptores que aumenten la selectividad y seguridad del tratamiento.

### No olvidemos la investigación básica

Los radiofármacos y las imágenes PET utilizados por la medicina nuclear no solo tienen valor en clínica: también se utilizan en investigación básica. Se trata de herramientas poderosas con las que los científicos pueden, por ejemplo, desarrollar modelos que ayuden a entender algunas enfermedades que nada tienen que ver con el cáncer. Uno de los últimos

ejemplos en España ha sido el estudio llevado a cabo por investigadores del Centro Nacional de Aceleradores (CNA) y el Hospital Universitario Virgen del Rocío (Sevilla), cuyos resultados fueron publicados hace unos meses en la revista *Applied Radiation and Isotopes*. En él, se utilizó la técnica PET para estudiar la hemorragia subaracnoidea, una enfermedad grave con una mortalidad elevada.

Los investigadores utilizaron el radiofármaco [18F]FMISO, capaz de detectar células que tienen una concentración baja de oxígeno, en ratas a las que se les había inducido una hemorragia subaracnoidea. Gracias al PET, pudieron encontrar “las zonas viables, que están ‘adormiladas’ pero son recuperables”, según explica la radiofarmacéutica de la Universidad de Sevilla y coautora del estudio, Laura Fernández. Aunque la intención de este estudio no es lograr un mejor diagnóstico de esta enfermedad en seres humanos, sí permitirá comprobar la eficacia de fármacos en un modelo experimental llevado a cabo con ratas. Algo que, a largo plazo, también podría mejorar el manejo de los pacientes. 

# Secuencia de operaciones y actividades de recarga en las centrales nucleares

Las centrales nucleares necesitan paralizar periódicamente su producción de energía para extraer el combustible gastado a lo largo del ciclo e insertar elementos frescos que restablezcan la capacidad de funcionamiento a plena potencia durante un nuevo ciclo. Esta actividad se denomina ‘Parada de Recarga’ (*Refueling Outage*, en inglés) e involucra maniobras como el desmontaje de la vasija del reactor, que requieren el acceso a la contención y a otras zonas de habitabilidad normalmente restringida durante la operación normal.

Durante una recarga se planifica un gran volumen de actividades que incluyen la manipulación y reubicación del combustible, involucrando a diversas organizaciones ajenas al propio titular de la instalación y cuya coordinación supone un despliegue organizativo que debe tener en cuenta todos los requisitos reguladores aplicables en los distintos estados operativos de la recarga, con el fin

de garantizar la seguridad en parada bajo el concepto de defensa en profundidad. Durante una recarga estándar se llevan a cabo del orden de 50 modificaciones de diseño, se emiten unas 10.000 órdenes de trabajo y la dedicación de personal está en torno a las 200.000 horas hombre. Estas cifras son ilustrativas de la magnitud de los trabajos que se realizan durante la recarga.

Este artículo describe la secuencia de operaciones y actividades más significativas de una parada de recarga estándar, identificando las diferencias entre las dos tecnologías nucleares existentes en España, que son las centrales tipo PWR (agua a presión, *Pressurized water reactor*) y BWR (agua en ebullición, *Boiling water reactor*).

■ Texto **Cristina Villalba Domínguez** | Jefa de la Unidad de Apoyo de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear | Colaborador **Rafael Mendilibar Silva** | Inspector residente en CN Almaraz | ■

Como cualquier otra fuente de energía, el combustible utilizado en las centrales nucleares se agota a medida que avanza el ciclo de operación, típicamente de 18 meses de duración. En las etapas finales del ciclo, la potencia obtenida por cada elemento de combustible se va reduciendo por el agotamiento del uranio fisionable, lo que debe ser compensado con los medios disponibles para el control de la reactividad. Este proceso se denomina ‘alargamiento del ciclo’ o ‘*core stretch-out*’, cuya duración está limitada por el quemado máximo permitido, que es un límite que se establece sobre el combustible con el fin de garantizar su integridad, tanto del que formará parte del ciclo posterior, como del que permanecerá en la piscina de combustible gastado o en cualquier otro sistema de almacenamiento.

La parada de recarga tiene la finalidad de extraer el combustible gastado durante

el ciclo y reponer un núcleo nuevo compuesto de elementos frescos, junto con elementos del núcleo anterior, tal que el rediseño del núcleo o la nueva configuración de los elementos de combustible restablez-

*La parada de recarga tiene la finalidad de extraer el combustible gastado y reponer un núcleo nuevo, para su funcionamiento a plena potencia durante el ciclo posterior*

can la capacidad de funcionamiento a plena potencia durante el ciclo posterior. Al tratarse de una parada prolongada, típicamente en torno a los 30 días, se aprovecha

para realizar actividades que no pueden llevarse a cabo en operación normal por razones de accesibilidad, disponibilidad de equipos, etc. Entre estas actividades, se encuentran modificaciones de diseño que requieren descargos de gran alcance e inspecciones en zonas del circuito primario que alberga al reactor, en las que el riesgo radiológico de permanencia en la zona de trabajo se reduce significativamente cuando el núcleo ha sido descargado completamente en la piscina de combustible.

Es preciso distinguir la parada de recarga de otras paradas de la planta, forzadas o programadas, que pueden ser parciales y de corta duración y suelen asociarse a problemas surgidos durante la operación que requieren llevar la planta al modo de operación adecuado para realizar las acciones correctoras y verificaciones pertinentes, estando sujetas a los criterios de notificación establecidos en la Instrucción del

Consejo IS-10 en cuanto a las paradas de la central.

El conjunto de actividades planificadas en una recarga se documenta en el denominado 'Programa general de actividades de recarga' y para su implantación se despliega la organización prevista por el titular de la instalación, que incluye la coordinación de las distintas organizaciones involucradas en su ejecución.

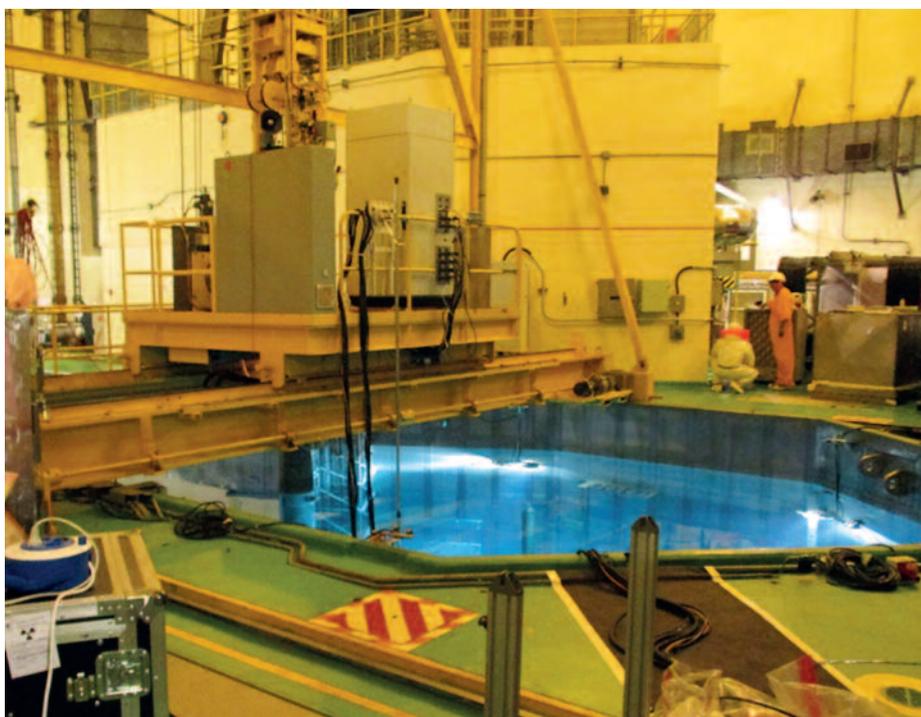
Para el CSN también es un período que requiere especial atención, tanto para supervisar el cumplimiento de los requisitos aplicables a la seguridad en parada como para programar las actividades de inspección y evaluación contempladas en el Plan Anual de Trabajo (PAT) que preferiblemente deban realizarse en este intervalo.

La documentación de las actividades del titular en la recarga está regulada mediante la Instrucción del CSN IS-02, que establece que el 'Informe de planificación de la recarga' sea remitido al CSN con cuatro meses de antelación y, asimismo, que con un mes de antelación se remita el 'Programa general de actividades de la recarga', el cual deberá actualizarse al menos 24 horas antes del comienzo. Un informe final de la recarga deberá remitirse al CSN en los tres meses tres meses posteriores a la parada.

La Instrucción IS-02 también impone requisitos para otros documentos a elaborar sobre aspectos de seguridad de la recarga, siendo de especial relevancia el 'Informe de seguridad de la recarga', de contenido relacionado con el diseño del núcleo y el impacto que pudieran tener las modificaciones implantadas, tanto físicas como relativas a las estrategias de operación, en las condiciones supuestas en los análisis de seguridad y en los límites de operación existentes.

### Seguridad en parada

El tratamiento de la seguridad durante la recarga ha evolucionado desde el licenciamiento inicial de las instalaciones, en gran parte por el mayor conocimiento del ries-



Cavidad y plataforma de recarga en un PWR.

go en parada. Existen estados operativos durante la parada en los que están indisponibles sistemas de seguridad, siendo poco frecuente la operación en esas condiciones. El desarrollo de los *Análisis probabilistas de seguridad en otros modos de operación* (APSOM) reveló que una parada de recarga puede contribuir al riesgo de daño hasta en una tercera parte, dato muy significativo, puesto que la duración de las recargas no suponen la tercera parte del funcionamiento de la instalación durante un ciclo. Por tanto, es muy importante el concepto de seguridad en parada y el cumplimiento de los procedimientos y requisitos administrativos aplicables para preservarla.

Las directrices sobre la seguridad en parada se recogen en la guía UNESA CEN-30 *Guía genérica de seguridad en parada*, que toma como referencia el documento NUMARC 91-06 *Guidelines for Industry Actions to Assess Shutdown Management* y la Guía de Seguridad 1.18 del CSN *Medida de la eficacia del mantenimiento en centrales nucleares*. La guía CEN-30 se emitió en 2015, como resulta-

do de un grupo de trabajo integrado por representantes de las centrales y del CSN, y supone aplicar a las actividades de recarga los conceptos de **Funciones Clave de Seguridad y defensa en profundidad**.

Las **Funciones Clave de Seguridad** (FCS) son aquellas que garantizan la disponibilidad de las barreras para la protección del público y medioambiente ante cualquier accidente que pueda postularse en los estados operativos de la parada y se identifican como:

- La **extracción del calor residual** que se produce en el combustible tras la parada del reactor, como consecuencia de la desintegración radiactiva de los productos de fisión. Esta función también incluye la refrigeración de la piscina de combustible.
- El **control del inventario** del refrigerante en contacto con el combustible, desde que se encuentra en el interior de la vasija hasta su almacenamiento posterior en la piscina, incluyendo las operaciones de transferencia a la misma.
- La **disponibilidad de fuentes de energía eléctrica**, incluyendo tanto las fuentes normales como las de emergencia, que ga-

ranticen la disponibilidad de los equipos.

-El control de la reactividad, evitando cualquier excursión de reactividad o pérdida de margen de parada como consecuencia de operaciones erróneas o fallos de equipos. Está incluida la disposición incorrecta de elementos de combustible.

-La integridad de la contención, debiendo estar garantizada la capacidad de cierre rápido del recinto en caso de accidente. En las centrales BWR esta FCS se refiere a la contención primaria y secundaria.

El concepto de **defensa en profundidad** responde al principio de que la prevención y mitigación de accidentes no dependa únicamente de una Estructura, Sistema o Componente (ESC), con independencia de la robustez y fiabilidad de la misma, compensando de esta forma posibles errores humanos y fallos de los propios equipos. Aplicado al diseño, este concepto se traduce en la existencia de barreras físicas, redundancia y diversidad de equipos, etc. Ejemplos de su aplicación a la operación se encuentran en la existencia de controles administrativos como restricciones de acceso, medidas de respuesta a emergencias, etc.

Para el propósito de gestionar el riesgo durante la Parada, la defensa en profundidad contempla la disponibilidad de los elementos siguientes:

-ESC que aseguren las FCS por métodos redundantes, alternativos y diversos.

-Planificar la recarga optimizando la disponibilidad de las ESC de las que dependen las FCS.

-Controles administrativos que soporten y/o suplementen los apartados anteriores.

Por otra parte, las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) aplicables a los modos de operación en parada deben cumplirse conforme a lo establecido en su aplicabilidad. Existen ETF de los sistemas de seguridad de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS), pues en los modos de parada previos al inicio de la descarga del núcleo también se postula el accidente de pérdida de refrigerante (LOCA -Loss of Coolant Accident- en parada); asimismo, las ETF incluyen condiciones operativas para los sistemas de energía eléctrica, los medios de control de reactividad y, en general, de los sistemas de uso específico en las maniobras de recarga que introducen modos de fallo que no suelen contemplarse durante la operación normal, como son los relacionados con las grúas de manipulación del combustible y las herramientas necesarias para su descarga y posterior carga. Entre las ETF más relevantes de la recarga se encuentran las relacionadas con el nivel de agua en las estructuras que albergan los elementos de combustible (va-

sija, canal de transferencia y piscinas de combustible), así como las características físico-químicas del agua supuestas en los análisis de accidentes (temperatura, nivel y concentración de boro, en el caso de los PWR). También resultan especialmente relevantes las ETF relacionadas con el sistema de evacuación de calor residual, cuya operación, está condicionada por el nivel del primario, el tiempo transcurrido tras la parada y las condiciones de presión en el circuito.

De lo anterior puede concluirse que la guía CEN-30 proporciona una aproximación genérica para gestionar la seguridad durante las paradas, tomando como referencia metodológica de análisis lo indicado en el apartado 8.4.2 de la guía del CSN GS-1.18 y las directrices del NUMARC 91-06, utilizando la información sobre el riesgo en parada que proporcionan las bases de licencia (incidentes o accidentes postulados), los APSOM (sucesos iniciadores) y los análisis de riesgo de incendio o inundación (sucesos internos). El objetivo es minimizar la frecuencia de las situaciones de mayor riesgo y, en caso de producirse, desarrollar planes de contingencia para mitigar y limitar sus posibles consecuencias; todo ello, mediante la adecuada planificación y control de actividades de la parada. La efectividad de la guía depende

MODOS DE OPERACIÓN (PWR)				
MODO	TÍTULO	CONDICIÓN DE REACTIVIDAD (K )	% DE LA POTENCIA TÉRMICA NOMINAL <sup>(a)</sup>	TEMPERATURA MEDIA DEL REFRIGERANTE DEL REACTOR (C°(F°))
1	Operación a potencia	≥ 0,99	> 5	NA
2	Arranque	≥ 0,99	≤ 5	NA
3	Parada caliente <sup>(a)</sup>	< 0,99	NA	≥ 176,7°C (350°F)
4	Parada caliente <sup>(b)</sup>	< 0,99	NA	≥ 176,7°C (350°F) > T > 93,3°C (200°F)
5	Parada fría <sup>(b)</sup>	< 0,99	NA	≤ 93,3°C (200°F)
6	Recarga <sup>(c)</sup>	NA	NA	NA

(a) Excluyendo el calor residual de desintegración.

(b) Todos los pemos de la tapa de la vasija del reactor completamente tensionados.

(c) Uno o más pemos de la tapa de la vasija del reactor distendidos.

MODOS DE OPERACIÓN (BWR)			
CONDICIÓN DE OPERACIÓN	DENOMINACIÓN	POSICIÓN DEL SELECTOR DE MODOS DE OPERACIÓN DEL REACTOR	TEMPERATURA MEDIA DEL REFRIGERANTE DEL REACTOR
1	Operación a potencia	Marcha (Run)	N/A
2	Arranque	Recarga(a) o Arranque/Espera Caliente (Refuel o Startup/Hot Standby)	N/A
3	Parada caliente (a)	Parada (Shutdown)	> 100°C (212°F)
4	Parada fría (a)	Parada (Shutdown)	≤ 100°C (212°F)
5	Recarga (b)	Parada o Recarga (Shutdown o Refuel)	N/A

(a) Todos los pernos de cierre de la tapa de la vasija totalmente tensados

(b) Uno o más de los pernos de cierre de la tapa de la vasija no completamente tensados.

de la adaptación que específicamente realice cada titular, lo que incluye el desarrollo de procedimientos para el control adecuado de los descargos asociados a cada actividad.

### Estados operativos

En el licenciamiento inicial de las centrales nucleares, el riesgo de la operación se asociaba a los modos de operación definidos en las ETF, identificados en las tablas a continuación, respectivamente para una central nuclear tipo PWR-Westinghouse y para una central tipo BWR-General Electric.

La mayor severidad de las condiciones de temperatura y presión de los modos en los que se postulan los accidentes de pérdida de refrigerante, LOCA, había contribuido a minimizar el riesgo en los modos de parada, 5 y 6, siendo la idea generalizada que el cumplimiento de las ETF proporcionaba un nivel de seguridad suficiente para descartar riesgos significativos. La experiencia operativa, sin embargo, reveló una vulnerabilidad ante la potencial pérdida de inventario o de los sistemas de refrigeración, en presencia de un calor residual significativo y en el transcurso de actividades que reducen la disponibilidad de equipos o comprometen el aislamiento con el exterior, lo que condujo a la elaboración en EE.UU. de la guía NUMARC 91-06, estableciendo directrices para gestio-

nar las actividades de la parada e incrementar el conocimiento de su impacto en la seguridad.

Posteriormente, los APSOM confirmaron estos aspectos, identificando estados operativos correspondientes a actividades con una mayor contribución al riesgo en parada. Como ejemplo, en el caso de un PWR las operaciones de drenaje del RCS, necesarias para la apertura del presionador o el desmontaje de la tapa de la vasija, implican mayor riesgo, debido a la existencia de menor inventario. El nivel más bajo que se alcanza en el circuito corresponde a la generatriz inferior de las ramas del RCS, por debajo incluso del nivel de media tobera y aproximadamente nueve metros por debajo del nivel de cavidad de recarga llena, requerido para las operaciones de descarga del núcleo desde la vasija hasta la piscina. En esa configuración es fundamental tener en cuenta el tiempo transcurrido tras la parada del reactor, para garantizar que el calor residual está dentro de la capacidad de refrigeración disponible.

Por tanto, para evaluar el impacto en la seguridad de las actividades planificadas durante la parada, deben determinarse los Estados Operativos (EOP) que definen la configuración de equipos y sistemas disponible en cada fase de la recarga.

Los EOP para una central tipo PWR, extraídos del APSOM, para los que se ha calculado el tiempo disponible para em-

prender acciones de recuperación, como el cierre rápido de la contención, en caso de pérdida de la extracción del calor residual, correspondiendo al tiempo hasta el descubrimiento del núcleo o hasta la ebullición del refrigerante, dependiendo del estado de integridad del RCS y según la configuración de la planta.

Los EOP de mayor riesgo, 11 y 12, corresponden, respectivamente, al drenaje del RCS a media tobera para el cierre de la boca de hombre del presionador y la posterior desgasificación del RCS; en estos EOP, con núcleo nuevo y bajo calor residual, el tiempo más limitante es de 38 minutos antes del inicio de la ebullición del refrigerante, lo que determina el tiempo disponible para el cierre de la contención.

Otros estados de riesgo son los identificados como 6a, 6b, 10a, 10b y 13, a niveles inferiores al denominado *inventario reducido* (90 cm por debajo de la brida de la vasija). En los dos primeros EOP, 6a y 6b, correspondientes al desmontaje de la tapa de la vasija, el tiempo disponible hasta la ebullición del RCS es de tan sólo 18 minutos, mientras que en los estados 10a y 10b, correspondientes al montaje de la tapa con núcleo nuevo, el tiempo disponible es de 57 minutos, aproximadamente el triple que en los anteriores, como consecuencia del menor calor residual.

El control de la seguridad en estos esta-

dos operativos se efectúa mediante el seguimiento de las FCS desde la puesta en servicio del RHR, al inicio de la recarga, hasta las fases de arranque tras completar el programa de actividades (en la práctica, modo 3 en las PWR y modo 2 para BWR). El seguimiento de las FCS se documenta en los informes sobre la recarga remitidos al CSN, conforme a la IS-02 y según se explica a continuación.

### Cumplimiento con la IS-02

La Instrucción IS-02 requiere en su artículo 6º que se remita al CSN, previamente a la recarga, un informe de planificación, programación, verificación, evaluación y seguimiento de la seguridad en parada que debe contener, además de la información relacionada con las FCS y el mantenimiento de la defensa en profundidad, las actividades de la parada, describiendo los hitos más significativos. El programa de recarga debe exponer la valoración de las FCS mediante un código de colores que permita verificar que la planificación se realiza con todas las FCS en la condición óptima para la defensa en profundidad

(VERDE), salvo que justificadamente se considere inevitable una condición AMARILLA, que deberá asociarse a un plan de contingencia. En todo caso, está prohibida la planificación en la que alguna FCS esté en condición ROJA.

*La efectividad de la guía depende de la adaptación que realice cada titular, lo que incluye el desarrollo de procedimientos adecuados a los descargos asociados a cada actividad*

Asimismo, la IS-02 establece que se documente y remita al CSN el *Informe final de recarga de las FCS*, que recoja la evolución real de las FCS y las acciones del titular para mantener la defensa en profundidad, como cambios de programación, planes de contingencia, etc. El informe debe contener un análisis comparativo res-

pecto a recargas anteriores a partir de un indicador denominado 'índice de severidad' que, definido para que se mantenga tan bajo como sea posible para cada FCS en una condición determinada (VERDE, AMARILLA O ROJA), permite valorar la efectividad de las mejoras implantadas por el titular en la gestión de la seguridad durante las paradas.

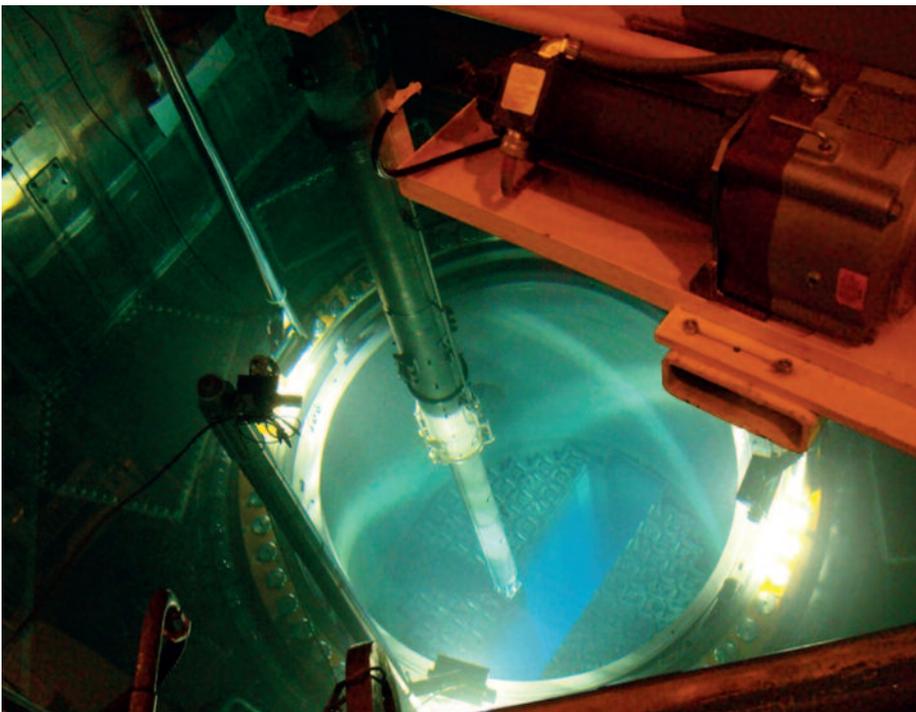
La información del programa general de actividades se debe presentar como una secuencia temporal que permita identificar el denominado camino crítico y, específicamente, información sobre las siguientes tareas:

- Programa de actividades de inspección en servicio.
- Actividades de mantenimiento.
- Modificaciones de diseño relacionadas con la seguridad.
- Plan de inspección del combustible gastado.
- Pruebas especiales o requisitos específicamente identificados por el CSN.
- Pruebas nucleares de arranque.

### Actividades de una recarga estándar

A continuación se exponen las actividades más significativas contempladas en la ruta crítica de una recarga convencional:

–**Reducción de potencia desde el 100%:** Al final del ciclo, el alto quemado del combustible y su menor rendimiento obliga a tomar acciones para mantener el nivel de potencia, mediante dilución de boro en las PWR y mediante el incremento del caudal de recirculación a través del núcleo y la reducción de la temperatura del agua de alimentación en las BWR. Estas actividades deben realizarse minimizando el movimiento de barras de control para mantener en su valor máximo el margen de parada que estas proporcionan y según procedimientos que incluyen precauciones relacionadas con los límites del combustible. Este proceso, denominado *stretch-out* está limitado en su duración por la capacidad de los sistemas implicados. Al-

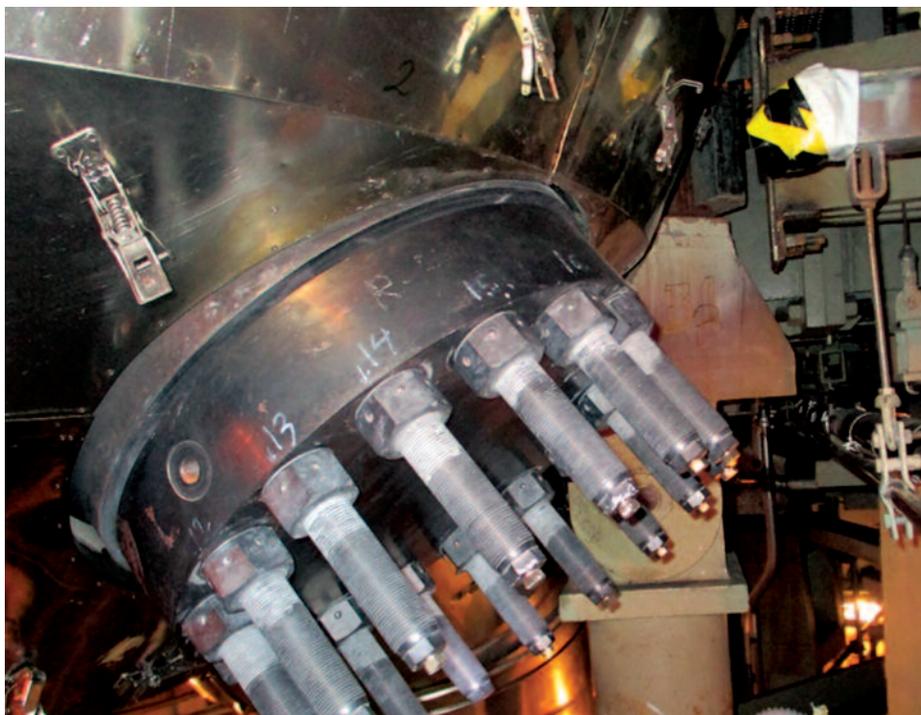


Recarga del núcleo PWR.

canzadas las condiciones en que ya no son efectivos, la potencia va decayendo hasta que el operador observe la tendencia de las barras de control a extraerse automáticamente para intentar mantener el nivel de potencia, momento en que se inicia la bajada de carga en turbina, programando el cierre secuencial de las válvulas de admisión de vapor escalones del orden de 3 Mw/min que permitan acomodar la respuesta del control del reactor. Asimismo, es preciso realizar una serie de maniobras para compensar la inserción de reactividad positiva producida por la reducción de potencia, en las PWR mediante una boración anticipada y en las BWR recuperando las condiciones normales de temperatura del agua de alimentación y reduciendo el caudal de recirculación, junto con la inserción secuencial de barras de control.

–**Hitos intermedios de la bajada de carga:** Durante la bajada de carga es necesario adaptar los sistemas a las condiciones de baja carga. Aproximadamente al 50% de potencia debe pararse una de las turbobombas de agua de alimentación principal y una bomba de condensado; en las PWR debe transferirse el control de nivel de los Generadores de Vapor (GV) a las válvulas de menor capacidad y en las BWR, al 30% deben conmutarse a baja velocidad las bombas de recirculación. Además, se deberán bloquear algunas actuaciones automáticas, como los disparos automáticos del reactor por señales de protección no necesarias. Estas acciones son realizadas por el operador, normalmente ante señales audiovisuales previstas en el diseño.

–**Descenso de carga hasta desacoplamiento/disparo de turbina:** A partir del 15% de potencia, la inserción de las barras de control se realiza manualmente y las válvulas de turbina pasan a maniobrase conjuntamente ya que la regulación secuencial es más inestable. Aproximadamente al 10% deberán comprobarse los bloqueos del disparo del reactor asociados



Boca de hombre para acceso a caja de aguas de un GV.

a la lectura elevada de los monitores de flujo neutrónico en los rangos intermedio y de fuente (que son los instrumentos de medida de la población neutrónica a bajas potencias y con el reactor subcrítico), así como la disponibilidad del condensador para asumir el rechazo de vapor que se producirá al disparar la turbina. Eléctricamente debe transferirse la alimentación de los equipos auxiliares necesarios a los transformadores de arranque, independientes de la generación de la unidad. En el secundario se habrán aislado los suministros de vapor desde las extracciones de la turbina y se realizarán drenajes del condensado de tuberías. Finalmente, la turbina debe ser disparada con carga inferior al 5%, en torno a 20-40 Mwe, debiendo comprobar el desacoplamiento del alternador y el embrague del virador, motor que mantiene el giro del rotor de la turbina, una vez parada, para que el enfriamiento sea dinámico, evitando pandeos y deformaciones.

–**Reducción de potencia hasta condiciones de cero carga:** Tras el disparo de la turbina, la reducción de potencia prosigue

mediante la inserción de las barras de control. La extracción del calor residual se produce, en las PWR, mediante los generadores de vapor, cuya alimentación se habrá transferido al sistema de agua de alimentación auxiliar, mediante motobombas, aunque también se dispone del bypass de turbina, que descarga vapor al condensador manteniendo automáticamente la temperatura de cero carga en el colector de vapor principal. En las BWR la extracción de calor residual se realiza mediante el bypass de turbina, que controla la presión prefijada en el reactor, mientras que el nivel de la vasija se mantiene con el sistema de agua de alimentación y el control térmico del aporte desde el sistema de limpieza de agua del reactor (RWCU), ya que los calentadores se encuentran aislados. Una vez insertadas las barras de control la central se encuentra en las condiciones de modo 3, con el reactor subcrítico (sin generación de potencia) y con la indicación de flujo neutrónico proporcionada por los canales del rango fuente y la temperatura mantenida por el sistema de bypass al condensador, correspondiente a



Tapa de la vasija e internos superiores (MABC) en su stand de acopio.

290°C en las PWR y 278°C en las BWR, en la fase previa al inicio del enfriamiento y despresurización.

**–Enfriamiento y despresurización hasta parada caliente:** Este proceso es más largo en el caso de un PWR, ya que deben mantenerse extraídos los bancos de parada -de longitud parcial, de los que no disponen los reactores BWR- mientras puedan darse cambios de reactividad como consecuencia de variaciones en la concentración de boro, venenos neutrónicos, temperatura, etc. Asimismo, en estas centrales es necesario borrar anticipadamente el RCS hasta la denominada “concentración de boro de parada fría”, en torno a los 2800 ppm, para garantizar el margen de

parada teniendo en cuenta la inserción de reactividad positiva que supone el enfriamiento desde la temperatura de carga, 290°C, hasta la temperatura de parada fría, 93°C. Por otra parte, la reducción de presión es también más prolongada en el caso de las PWR, debido al mayor margen entre la condición de partida, de 157 Kg/cm<sup>2</sup>, hasta la presión de corte de las bombas del sistema de evacuación de calor residual, en torno a los 20Kg/cm<sup>2</sup>.

En general, durante el enfriamiento deben tenerse en cuenta una serie de precauciones para preservar las propiedades de los materiales y evitar esfuerzos térmicos que puedan dañarlos y evitar la actuación intempestiva de los automatismos de pro-

tección asociados a esta fenomenología. El ritmo máximo de enfriamiento no debe superar los 55,5°C/h, restringiéndose aún más en condiciones frías, por debajo de 60°C en el RCS. También son necesarias la purificación y desgasificación del RCS con el fin de minimizar la dosis en el momento de abrir el sistema. Para ello es necesario incrementar la descarga de los sistemas de control químico y alinearla a los filtros y desmineralizadores que retienen los productos de fisión y corrosión, potenciales fuentes de dosis; en la desgasificación se barre la atmósfera del RCS hacia el tanque de decaimiento de gases, al tiempo que se suministra nitrógeno para evitar mezclas explosivas en el circuito.

El enfriamiento se realiza en una secuencia escalonada de maniobras de enfriamiento-despresurización para mantener el grado de subenfriamiento y con ello el margen hasta la ebullición y evitar condiciones de sobrepresión en frío asociadas a la pérdida de ductilidad del material. En este sentido, se bloquean las bombas de los sistemas conectados al RCS que no sean necesarias para evitar el pico de presión que produciría su arranque intempestivo. Los medios para el enfriamiento en un PWR son, preferentemente, el bypass de turbina hacia el condensador, o bien las válvulas de alivio de los GV. La despresurización, mientras exista burbuja en el presionador, puede realizarse mediante una única ducha, conectada al lazo de la BRR que se haya mantenido en funcionamiento. Son hitos importantes en esta actividad los bloqueos de la inyección de seguridad por baja presión de vapor en el secundario (48 Kg/cm<sup>2</sup>) con una presión en el RCS superior a 140 Kg/cm<sup>2</sup> y el posterior aislamiento de los acumuladores a 70 Kg/cm<sup>2</sup> para evitar su descarga al RCS por gravedad.

En las BWR el enfriamiento se realiza preferentemente a través del RWCU. Durante toda la parada se mantienen en funcionamiento las bombas de recirculación a

baja velocidad para homogeneizar el enfriamiento en todo el volumen de la vasija, evitando la estratificación térmica. La presión se controla por las líneas de drenaje al condensador y consumos varios, como la turbobomba de agua de alimentación. Entre los hitos destacables de la despresurización se encuentra la transferencia del control del nivel de la vasija a 45Kg/cm<sup>2</sup> a la válvula de bypass de la turbobomba.

–**Enfriamiento y despresurización hasta parada fría:** En la denominada “segunda fase de enfriamiento” del RCS, este se transfiere al sistema de evacuación de calor residual, RHR, una vez alcanzada la presión de corte de las bombas del sistema, típicamente en torno a 20 Kg/cm<sup>2</sup> en las PWR y 10 Kg/cm<sup>2</sup> en las BWR, valor que incluye un margen suficientemente alejado del tarado de apertura de las válvulas de seguridad del sistema, que lo protegen frente a la sobrepresión.

Una vez alineado el RHR se retira de servicio el condensador, previa desconexión del sistema de vacío (off-gas) para llevarlo a la presión atmosférica y, posteriormente, cerrar las válvulas de aislamiento de vapor principal (MSIV). El enfriamiento con el RHR prosigue hasta las condiciones de parada fría (T<93.3°C PWR; T<100°C BWR). En las BWR, una pequeña parte (unos 20 l/s) del caudal de descarga del RHR hacia el núcleo se deriva hacia los rociadores de la cabeza de la vasija para homogeneizar la temperatura entre las partes superior e inferior de la vasija.

–**De parada fría a parada de recarga:** Dada la diferencia entre las maniobras a realizar dependiendo de la tecnología de la instalación, se recogen a continuación las maniobras más significativas, separadamente para cada tipo:

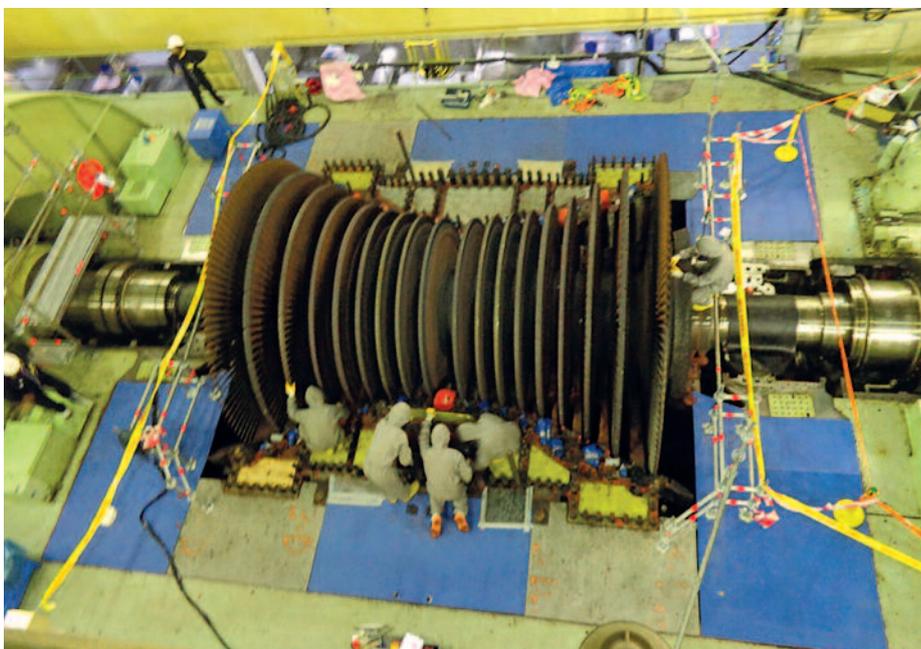
En las centrales PWR-W las maniobras previas a la entrada en modo 6 se resumen a continuación:

• **Colapso de burbuja:** El enfriamiento del RCS llevará a colapsar la burbuja del presionador, que hasta este momento propor-

cionaba el control de presión del RCS, por la acción de la ducha. El operador debe incrementar el caudal de carga hasta que el nivel en el presionador alcanza el 90%, dejando espacio suficiente para que pueda observarse el efecto de la ducha; en este punto se conectan los calentadores, para expandir el agua hasta las boquillas rociadoras y que estas pierdan eficacia. Cuando el operador observe que la presión ya no responde a la ducha, el presionador ya no se encuentra en saturación, condición que se identifica como de “primario sólido”.

• **Control de presión:** Con el RCS sólido el control de la presión se realiza alineando la

tura de la vasija la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al circuito permite eliminar cobaltos y optimizar la purificación. La incorporación de aditivos al RCS obliga a mantener un caudal mínimo en el RCS que los distribuya homogéneamente, mediante una bomba de carga o una BRR. Esta maniobra debe realizarse por debajo de 80°C y con el RCS sólido, para evitar la acumulación de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el espacio vapor del presionador. Es responsabilidad de Química y Radioquímica determinar la idoneidad de las condiciones del RCS para prescindir de aditivos y parar la BRR en funcionamiento, posibilitando la apertura del circuito, a



Trabajos en rotor de turbina de baja presión (BWR, zona controlada).

descarga a través de la conexión con el RHR que incluye una válvula controladora de presión, siendo necesario mantener la presión por debajo de 31 Kg/cm<sup>2</sup>, que es la presión de apertura de las válvulas de seguridad del RHR. Asimismo, aplican las precauciones contra la sobrepresión del RCS siempre que esté puesta la tapa de la vasija, manteniendo sólo una bomba de carga en funcionamiento y el bloqueo de la conexión de los calentadores, salvo que se disponga de un venteo del RCS de 17 cm<sup>2</sup>.

• **Oxigenación del RCS:** Antes de la aper-

partir de la toma de muestras periódica del RCS.

• **Inyección a sellos de las BRR:** Aunque las BRR se encuentren paradas es necesario mantener la inyección a los sellos mientras que el nivel del RCS se mantenga por encima del difusor de las bombas, por lo cual deberá mantenerse la bomba de carga en marcha hasta que el drenaje del RCS permitan prescindir de la inyección.

• **Despresurización del RCS:** Mediante la regulación de la apertura de las válvulas controladoras de caudal y/o de presión se



Tapa vasija BWR y equipo de sujeción e izado.

despresuriza el RCS hasta una presión de  $2\text{Kg/cm}^2$  y una temperatura inferior a  $60^\circ\text{C}$  y, en todo caso, superior a  $40^\circ\text{C}$ , para evitar el riesgo de la sobrepresión en frío. En estas condiciones se considera que el RCS está enfriado y despresurizado.

• **Preparación de accesos a contención y apertura de la vasija:** El servicio de Protección Radiológica es responsable de que las condiciones de la contención sean adecuadas para permitir el acceso de personal y la apertura de la escotilla de equipos para

introducción de material; para ello la purga de la contención se realizará a través de las válvulas de máxima capacidad.

Antes de la apertura de la vasija es necesario iniciar el drenaje del RCS, que se encontraba lleno después de colapsar la burbuja en el presionador, aumentando el caudal de descarga hacia el tanque de control de volumen y derivando el exceso hacia el sistema de recuperación de boro, hasta el nivel objetivo de “inventario reducido” (90 cm por debajo de la brida de la vasija). Durante el drenaje se alinea un suministro de nitrógeno hacia el presionador y la cabeza de la vasija que, posteriormente deberá ventearse hacia la contención antes de la apertura de la boca de hombre del presionador, lo que proporciona una protección del RCS frente a la sobrepresión. Al 10% de nivel en el presionador y tras la apertura del mismo se debe drenar el agua retenida en la U invertida de los tubos de los GV, operación denominada “rotura de sifones”, que supone un volumen total de agua contaminada de unos  $60\text{ m}^3$ ; el vaciado de este volumen se realiza mediante el suministro de nitrógeno a través de la válvula de drenaje de las cajas de agua de los GV.

Para el inicio del desmontaje de la vasija y la descarga del núcleo debe asegurarse el buen funcionamiento de la maquinaria de manipulación de cargas pesadas (grúa polar y plataforma de recarga en contención, puente-grúa en combustible, polipastos, etc).

A la cota correspondiente al inventario reducido podrá aislarse la inyección a sellos de las BRR y realizar el denominado “backseat”, consistente en desacoplar el motor y el cuerpo de la bomba, que al quedar asentado sobre la tubería del RCS mantiene la integridad del circuito a la presión atmosférica y hasta  $1,5\text{ Kg/cm}^2$ .

El funcionamiento a inventario reducido o a niveles cercanos a media tobera es necesario parar uno de los dos trenes RHR y reducir el caudal de aspiración de la



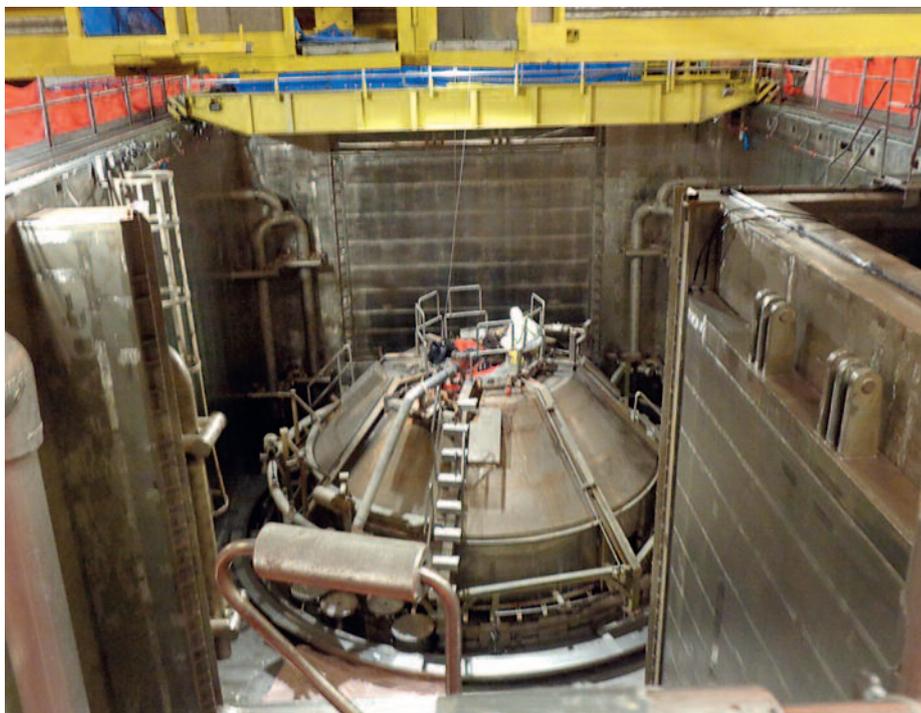
Parte superior contención metálica de un BWR (trabajos de inspección visual).

bomba del tren en operación para evitar su cavitación como consecuencia de la pérdida de carga neta positiva de succión (NPSH) producida por la reducción del nivel y la desgasificación. Sin embargo, el caudal debe ser suficiente para mantener abiertas las válvulas de retención de las líneas, evitando el ‘clapeteo’ o ‘tapping’ a caudales muy bajos, ya que podría deteriorar los internos de la válvula. Por tanto, el RHR debe funcionar en un rango de caudales máximo y mínimo que, además, sea suficiente para mantener la temperatura del RCS por debajo de 60°C, lo que depende del tiempo transcurrido tras la parada del reactor. Las ETF establecen las limitaciones necesarias para tener en cuenta estos parámetros.

El tiempo mínimo transcurrido desde la parada hasta el inicio de los drenajes del RCS es de 60 horas y se establece como el tiempo a partir del cual la pérdida de uno de los trenes del RHR en la peor configuración posible de nivel y caudal, en las condiciones de enfriamiento más conservadoras de los cambiadores de calor, no conducirá a la ebullición del RCS ni a aumentos significativos de temperatura en intervalos de tiempo que impidan aplicar acciones correctoras.

La vigilancia del nivel del RCS requiere habilitar instrumentación que proporcione indicación fiable y diversa del nivel a media tobera. Entre otra instrumentación, se instalan conductos transparentes (TYGON) para indicación óptica local del nivel, visible desde la plataforma de recarga. Asimismo, un sistema de medida de nivel por ultrasonidos deberá encontrarse en servicio durante el funcionamiento con las ramas del RCS parcialmente llenas. Es posible disponer de instrumentación adicional, dependiendo específicamente del diseño y operación de cada planta.

Con el nivel en la parte inferior de la brida se procede a la retirada de la losa antimisiles, cuya función es absorber el impacto de una posible eyección de barras de

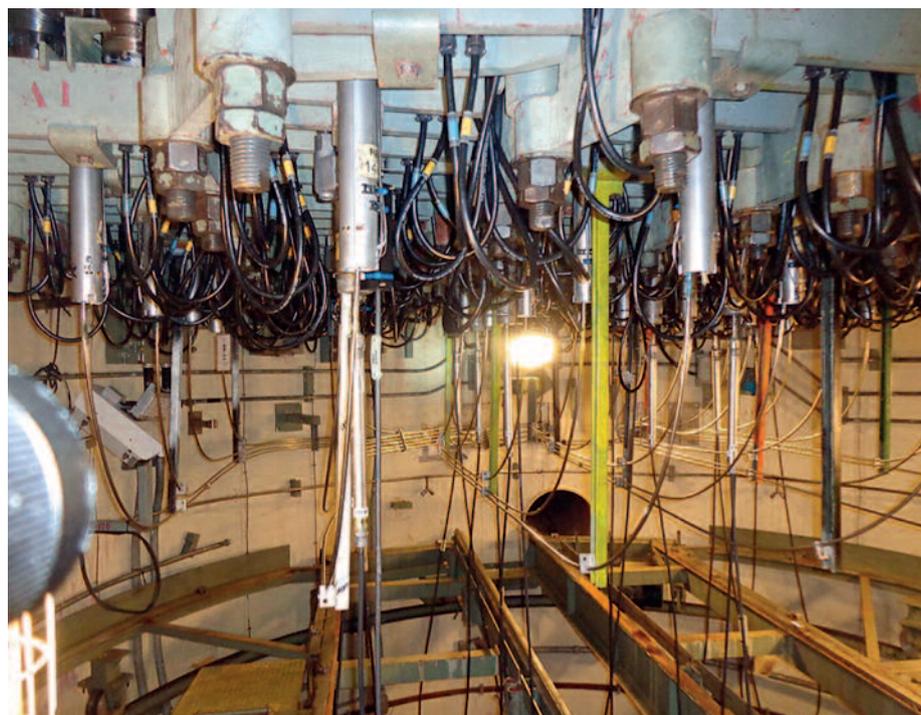


Aislamiento tapa vasija BWR.

control para, a continuación, desconectar la instrumentación de la cabeza de la vasija y los mecanismos de accionamiento de las barras de control, instalando a continuación una junta tórica de sellado entre la cavidad de recarga y el foso de la vasija, evi-

tando la introducción de agua y material extraño durante la recarga.

El inicio del distensionado de los pernos de la vasija marca la transición al modo 6 de recarga. A medida que se va elevando la tapa de la vasija se va inundando



Pedestal CRD en un BWR.



Estanque esenciales BWR con aspersión por pruebas de caudal.

la propia vasija, la cavidad y el canal de transferencia, por rebose del agua aportada por el RHR, alineada su aspiración al TAAR. Finalmente, todo el espacio estará lleno con agua procedente del TAAR, a la concentración de boro de parada fría. En un PWR el combustible se almacena en la piscina situada en el edificio de combustible y comunicada con el edificio de contención a través del canal de transferencia y la cavidad de recarga.

- **Descarga de combustible:** Para iniciar las denominadas ‘alteraciones del núcleo’, todos los espacios que albergan el combustible se encuentran llenos con agua borada a la concentración de parada fría. Las ETF establecen requisitos de nivel y temperatura del agua y de disponibilidad de los sistemas RHR y de refrigeración de la piscina para mantener su temperatura inferior a 60°C y un nivel mayor de 7 m sobre los elementos de combustible. Deberá vigilarse la integridad de la contención y la operación de los sistemas de ventilación de los recintos de contención, combustible y Sala de control, para garantizar la depresión requerida respecto a la atmósfera exterior.

- **Operaciones con núcleo descargado:** Completada la descarga del núcleo, se independizan los edificios de contención y combustible. En la cavidad se vuelven a posicionar la tapa de la vasija y los internos

*Deberá vigilarse la integridad de la contención y los sistemas de ventilación, combustible y Sala de control, para garantizar la depresión requerida respecto a la atmósfera exterior*

superiores sobre la brida, sin atornillar, para drenar nuevamente el RCS hasta media tobera y colocar unas bridas de obturación en las toberas de entrada a las cajas de agua de los GV para evitar la entrada de materiales extraños. Con la carga térmica localizada sólo en las piscinas de combustible pueden iniciarse trabajos que supongan descargos de gran alcance. Entre los hitos

más destacables se encuentran las inspecciones del combustible, del RCS (GV, vasija, soldaduras...) y pruebas de vigilancia relevantes, como son las pruebas integradas de las salvaguardias de ingeniería (ESFAS).

Para una **central BWR** al alcanzar la parada fría deben realizarse las siguientes maniobras hasta el modo de recarga e iniciar la descarga del núcleo:

- **Aislamiento de la vasija respecto a las líneas de vapor:** Consiste en el cierre de las líneas de venteo de la vasija y las válvulas de aislamiento de vapor principal (MSIV), con el fin de evitar la dispersión de partículas disueltas en el vapor durante el enfriamiento y rociado de la vasija y prepararla para su llenado posterior.

- **Enfriamiento y despresurización del RCS:** Se considera que el RCS está enfriado y despresurizado en condiciones de presión atmosférica y temperatura en torno a los 35°C, en todo caso superior a 30°C para mantener el suficiente margen con respecto a la temperatura fría del material de la vasija (21°C). En estas condiciones se paran las bombas de recirculación.

- **Llenado de la vasija:** Con la vasija despresurizada se llena hasta el nivel de la brida, inyectando agua del sistema hidráulico de los mecanismos de accionamiento de las barras de control (CRD), manteniendo el rociado de la cabeza de la vasija que se había establecido por medio del RHR.

- **Preparación de accesos:** Se pondrá en funcionamiento la purga del pozo seco y de la contención secundaria, realizando toma de muestras periódicas del RCS para verificar las condiciones radioquímicas. En el secundario se mantendrá en funcionamiento una bomba de vacío del condensador para purgar los gases, manteniendo una válvula rompedora de vacío parcialmente abierta.

- **Apertura de la vasija:** Debe verificarse la operabilidad de las herramientas de manipulación de cargas pesadas, como la tapa del pozo seco y la propia tapa de la vasija, como la grúa polar, la plataforma de recar-

ga y a los polipastos de izado, además del resto de herramientas especiales necesarias en los edificios del reactor y de combustible. El combustible gastado se encontrará siempre bajo un nivel de agua mínimo de 7m en todas las áreas previstas para su transporte, manipulación o almacenamiento, debiendo estar disponibles el aporte de agua del sistema de distribución de condensado y la instrumentación de nivel en parada.

La piscina donde se almacenan los elementos que se reutilizarán en el ciclo nuevo se encuentra en la parte superior del edificio del reactor. En el edificio de combustible se encuentra la piscina del combustible gastado que ya no retornará a la vasija y debe almacenarse durante un

tiempo mínimo de 3 ó 4 meses para su decaimiento (tiempo que podría aumentar para altos quemados). Asimismo, en el edificio de combustible se encuentra la bóveda de almacenamiento de elementos frescos para el nuevo núcleo. La comunicación física entre los edificios de reactor y combustible se realiza a través del tubo de transferencia, estructura que funciona como una esclusa de aislamiento entre ambos espacios y dispone de mecanismos para su drenaje y llenado sin afectar al nivel de las piscinas intercomunicadas.

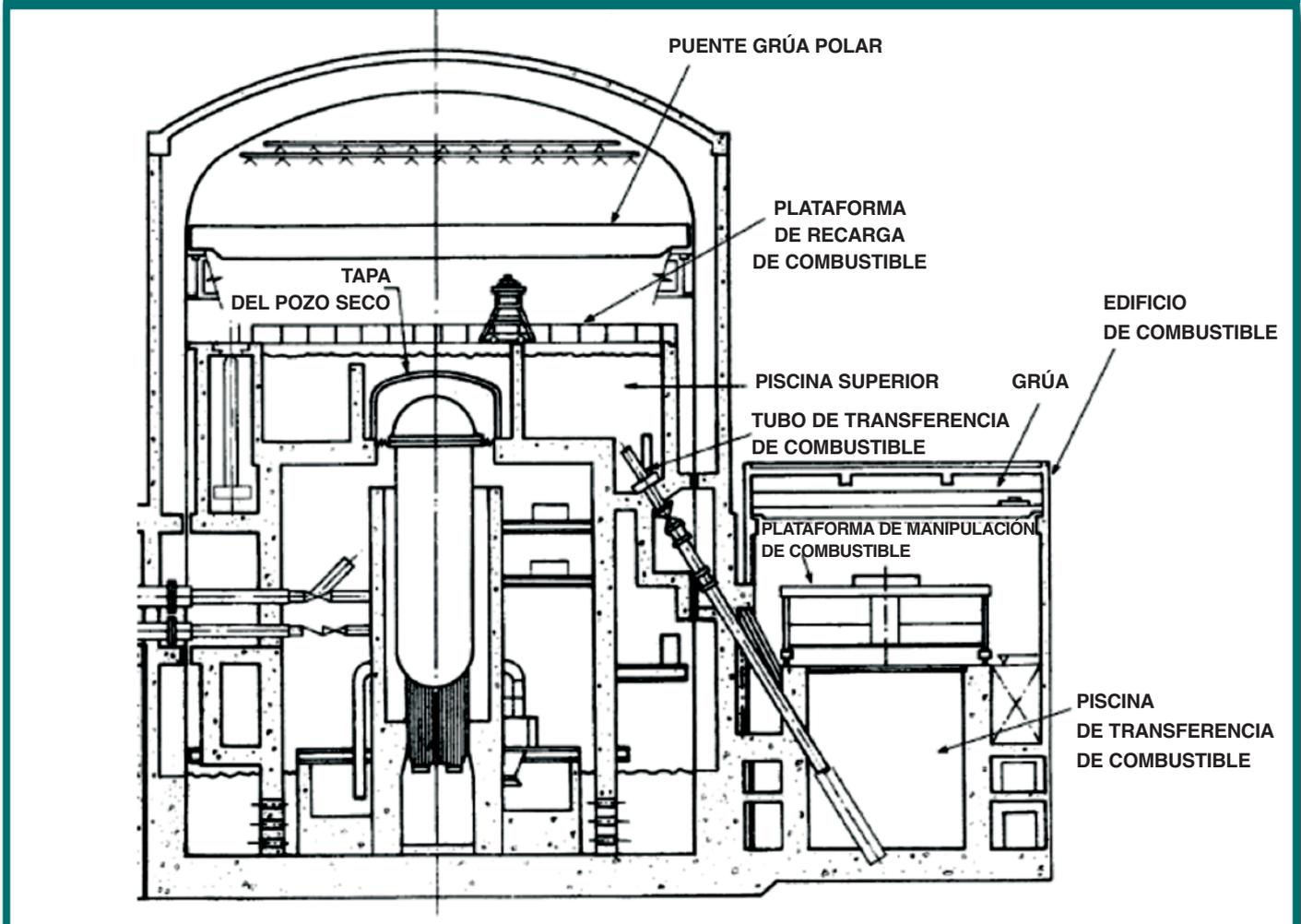
En la siguiente figura se ve la ubicación de las piscinas en una central BWR:

Las maniobras se inician con el vaciado de las piscinas superiores de la cavidad del reactor (zona donde se encuentra la tapa

del pozo seco), excepto la piscina superior conectada al tubo de transferencia, que mantendrán su nivel de agua. Posteriormente, se desmontan la tapa del pozo seco, el aislamiento de la vasija y la instrumentación superior *in-core*, para iniciar el distensionado de los pernos de la vasija, operación que determina la entrada en el modo 5 de recarga.

Con la vasija abierta se procede a la extracción de los internos superiores, empezando por el secador de vapor, que se almacena en la piscina superior izquierda. A continuación se drena parcialmente la vasija, mediante el RWCU hacia el depósito de agua de recarga, hasta la generatriz inferior de las tuberías de vapor principal, para colocar los obturadores que impiden

### EDIFICIO DE CONTENCIÓN Y COMBUSTIBLE (BWR)



la introducción de elementos extraños en las líneas. Posteriormente, se procede al llenado de la vasija y de la cavidad del reactor a medida que se extrae el separador de humedad, que se acopia en la piscina superior.

• **Descarga de combustible:** La interconexión entre las piscinas superiores y la piscina del edificio de combustible se realizará para disponer de un camino libre durante las alteraciones del núcleo con el nivel de agua requerido en las ETF, disponiendo del RHR y del propio sistema de refrigeración de las piscinas para mantener su temperatura por debajo de 37,7° C.

Deberá vigilarse la integridad de la contención y la operación de los sistemas de ventilación de los recintos de contención, combustible y Sala de control para garantizar la depresión requerida respecto a la atmósfera exterior.

• **Operaciones con núcleo descargado:** Una vez descargado el núcleo y con la carga térmica localizada en las piscinas de combustible, pueden iniciarse los trabajos que supongan descargos de gran alcance o que no pueden realizarse durante la opera-

ción normal, de forma similar a como se ha indicado para las PWR.

### Finalización de la recarga

Una vez finalizada la carga del núcleo, las maniobras inversas deben realizarse similarmente a como se ejecutaron en la baja-

*Finalizada la carga,  
las maniobras inversas deben  
realizarse como se ejecutaron  
en la bajada, debiendo  
garantizar la operabilidad  
de los sistemas antes de entrar  
en los modos de operación*

da, con algunas diferencias relacionadas con aspectos diversos, como la potencia y el vapor residual, debiendo garantizar la operabilidad de los sistemas antes de entrar en los modos de operación cuya aplicabilidad es requerida en las ETF.

Se mencionan a continuación los principales hitos para el arranque:

- Pruebas en parada fría. Verificación del alineamiento y disponibilidad de instrumentación y sistemas, incluyendo su acondicionamiento, como el venteo para eliminar bolsas de aire como consecuencia del funcionamiento con llenado parcial y en condiciones de vacío.
- En modo 5, desgasificación del sistema hasta conseguir el RCS lleno y venteado, manteniendo la temperatura en los valores de parada fría.
- Inicio del calentamiento y presurización hasta el aislamiento del RHR, que se realizará, en el caso de las PWR, tras la formación de burbuja en el presionador y con suficiente generación de vapor para transferir el enfriamiento al secundario.
- Arranque del reactor. Al alcanzar la temperatura de cero carga (~280°C), hacer crítico el reactor, determinando previamente la secuencia de extracción de barras de control mediante el cálculo de la “posición estimada de criticidad”.
- Calentamiento y presurización del reactor hasta condiciones nominales de presión y temperatura, a las que se realizará la prueba hidrostática del primario, de especial relevancia para descartar fugas en la barrera de presión y establecer valores de referencia para el seguimiento de las fugas no identificadas que puedan producirse durante la operación normal.
- Establecimiento de la integridad de la contención.
- Establecimiento de sellados de vapor, con presión suficiente en el colector de vapor principal. Deberán abrirse las válvulas de aislamiento de vapor principal (MSIV).
- Puesta en servicio del condensador, al obtener las condiciones de vacío.
- Calentamiento de tuberías de vapor principal y rodaje de turbina, aproximadamente al 5% de potencia.
- Arranque de equipos auxiliares y normalización de los suministros de vapor.
- Con una generación de potencia entre 15 y 25 Mwe, sincronización a la red, acoplamiento y toma de carga hasta el 100%. 



Canal y torres de refrigeración del agua de circulación en un BWR.

# Reacción en cadena

## ESPACIO

### Japón logra posar dos naves en un asteroide

La agencia espacial japonesa (JAXA) ha anunciado que su sonda *Hayabusa 2* depositó dos pequeños vehículos móviles en la superficie de un asteroide. Se trata de la primera vez que se consigue concluir con éxito un programa espacial de estas características.

La *Hayabusa 2* lleva varios meses aparcada en órbita alrededor de su objetivo, un asteroide de alrededor de un kilómetro de diámetro llamado Ryugu. La sonda orbita a unos 20 kilómetros del asteroide, una distancia perfecta para ofrecer imágenes muy detalladas.

A finales de septiembre, los técnicos de la JAXA ordenaron a la sonda descender hasta solo cincuenta metros del suelo, soltar sus dos *rovers* en caída libre



El objetivo de la misión japonesa es analizar la composición química del suelo del asteroide.

y volver a elevarse. Ambos artefactos gemelos reciben el nombre de *Minerva 2*. El primero que llevaba ese nombre iba a bordo de la sonda anterior y debía aterrizar en el asteroide Itokawa hace 13 años, pero el aparato erró el blanco y se perdió en el espacio. Las nuevas sondas *Minerva* tienen el aspecto y tamaño de unas la-

tas de conserva cilíndricas cubiertas de células fotoeléctricas para alimentar a sus equipos. No necesitan paracaídas ni sistema de frenado, ya que la gravedad de Ryugu es tan débil que les llevó un cuarto de hora recorrer los cincuenta metros. Sus equipos que analizan la composición química del suelo.

## ENERGÍA

### El hidrógeno acelera y pide paso

El hidrógeno como fuente de energía es una de las alternativas para liberarnos del uso de combustibles fósiles, pero es necesario que su obtención sea limpia, esté disponible y el coste sea asumible. Cuatro empresas europeas (una alemana, una danesa y dos españolas) han abierto la puerta para que sea una realidad. Cada una especializada en una fase del proceso de producción y distribución del hidrógeno, trabajan ya en el abastecimiento de este elemento químico, generado a partir de energías renovables, a la flota de autobuses

de la ciudad alemana de Rennerod, situada al norte de Frankfurt, o a poblaciones de Escocia.

La clave para ver circular por nuestras ciudades coches de hidrógeno, el elemento más abundante en el universo, con mayor potencial energético, incoloro, inodoro, no tóxico, el más ligero de todos y que aporta a la atmósfera vapor de agua, en vez de dióxido de carbono, es desligarlo de los otros a los que se encuentra asociado (como el oxígeno



en el caso del agua) para usarlo y mover los motores eléctricos de forma eficaz y económica.

# Islandia repuebla los bosques que arrasaron los vikingos

Hace un milenio, la mitad de Islandia estaba ocupada por bosques, hasta que el ser humano y los volcanes acabaron con ellos. Actualmente, la ausencia de árboles llama la atención a los miles de turistas que visitan cada año el país y la mayoría lo achaca a las bajas temperaturas.

Sin embargo, hace poco más de mil años, entre el 25 y el 40% del país estaba cubierto de bosques y fueron los vikingos quienes los arrasaron. Y es que Islandia estuvo completamente deshabitada durante milenios. Los primeros colonos no llegaron hasta el siglo IX, procedentes de lo que hoy es Noruega, y se encontraron un país



Los islandeses quieren que los árboles vuelvan a conquistar el paisaje de su isla.

boscoso desde las montañas hasta la costa. Sin embargo, su necesidad de cultivar la tierra, dedicar pastos al ganado y quemar madera para calentarse o producir armas y otros utensilios de hierro llevó a una

paulatina pérdida de superficie forestal. El proceso fue rápido. Se estima que hacia el año 1300, los árboles ya empezaban a escasear. Hoy ya no hay bosques viejos. La actividad de la industria del papel ha puesto

en riesgo la riqueza ecológica de esta zona, en un problema similar al de las selvas amazónicas. El país ha perdido el 95% de su cubierta forestal. Una deforestación que ha empeorado la erosión del suelo y se habla de riesgo de desertificación. De hecho, alrededor del 40% de la superficie islandesa es considerada desierto.

Esta situación puede cambiar si prosperan los planes de reforestación emprendidos por el gobierno islandés. El objetivo oficial fijado es el de alcanzar el 12% de superficie arbolada para el año 2100. Una meta para la que, curiosamente, el cambio climático podría convertirse en un buen aliado.

## AERONÁUTICA

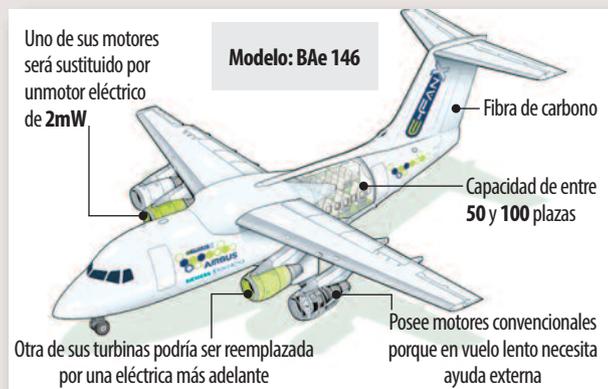
# El futuro de la aviación serán los motores eléctricos

El sector de la aviación comercial sabe que el futuro está en los motores eléctricos, y Siemens y Airbus ya trabajan unidos para el desarrollo de este tipo de propulsores. Ya han sido tres aparatos eléctricos los que han volado con éxito, aunque eran monoplaza o tenían una capacidad máxima para dos ocupantes. El gran salto se ha dado con Rolls Royce, que se ha unido al grupo para sacar adelante un motor 100% eléctrico que se montará en un avión comercial real.

El modelo elegido ha sido un BAe-146, cuatrirreactor de ala alta y fabricación británica,

del que se construyeron unas 400 unidades y cuyo usuario más singular es el escuadrón 32 de la RAF (Royal Air Force), responsable de los vuelos de la familia real británica. En ese avión, uno de los cuatro motores alimentados por gasoli-

na de aviación será sustituido por un motor eléctrico de 2MW y 2.700 caballos de potencia. En este proyecto, llamado E-fan X, Airbus construirá la arquitectura de control e integrará los sistemas. Rolls-Royce adaptará el motor y su reactor a la estructura existente junto al generador y la electrónica, mientras que Siemens está ya fabricando el motor eléctrico y su unidad de control, el inversor, los convertidores y la distribución de potencia. El plan es que este aparato, con capacidad para unos 100 pasajeros, despegue por primera vez en 2020.

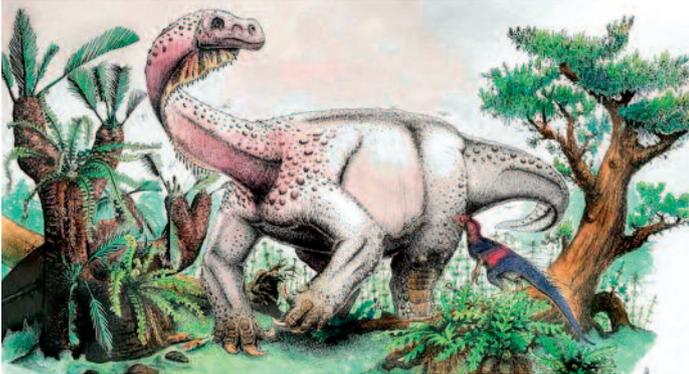


## PALEONTOLOGIA

## Descubren un dinosaurio del Jurásico que pudo pesar hasta 12.000 kilos

Un equipo de expertos de la Universidad de Witwatersrand, en Johannesburgo, ha descrito una nueva especie de dinosaurio saurópodo, el *Ledumahadi mafube*, encontrado en Sudáfrica, donde vivió hace 200 millones de años y que fue pariente cercano y antecesor del brontosaurio. Los restos pertenecerían a un espécimen adulto, de unos 14 años, con un peso de 12.000 kilos, según un estudio que publica la revista británica *Current Biology*.

Este nuevo dinosaurio caminaba a cuatro patas, anticipando así, durante el Jurásico, el sistema de desplazamiento que posteriormente perfeccionaría el brontosaurio y sus semejantes. Uno de los autores del estudio, Jonah Choiniere, de la Universidad de Witwatersrand, señaló que este hallazgo muestra que "hace ya 200 millones de años, estos animales se habían convertido en los mayores vertebrados que han caminado por la Tierra.



El nuevo saurópodo vivió hace 200 millones de años en Sudáfrica.

## LIBROS

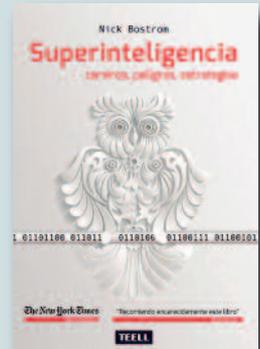
## Superinteligencia

Nick Bostrom

Editorial Teell. 336 páginas

El cerebro humano tiene unas capacidades de las que carecen otros cerebros animales. Es debido a estas capacidades distintivas por las que nuestra especie ocupa una posición dominante. Otros animales tienen músculos más fuertes o garras más afiladas, pero nosotros tenemos cerebros más inteligentes.

Si los cerebros artificiales llegaran algún día a superar a los cerebros humanos en inteligencia general, entonces esta nueva inteligencia llegaría a ser muy poderosa. De igual manera que el destino de los gorilas depende ahora más de los humanos que de ellos mismos, también el destino de nuestra especie pasaría a depender de las acciones de la superinteligencia artificial. Pero nosotros tenemos una ventaja: podemos hacer el primer movimiento. ¿Será posible construir una IA seminal o preparar las condiciones iniciales para que podamos sobrevivir a la explosión de inteligencia? ¿Cómo podríamos lograr una detonación controlada? Este libro traza su camino a través de un terreno vasto y de dificultad prohibitiva, aunque su escritura lúcida, lo hace parecer fácil.



## TRANSPORTE

## Este taxi volará en 2025

No es ciencia ficción. El prototipo de taxi aéreo de las fotos volará en 2025. Sin conductor alguno y con un modelo de negocio que parece impensable en la actualidad, pero que será habitual en un futuro que ya está a la vuelta de la esquina, la compañía estadounidense de helicópteros Bella Air se ha asociado con Uber



Los taxis aéreos se prevén para dentro de un quinquenio.

Technologies Inc, para revolucionar el sector del transporte de personas.

Se espera que en 2020 comiencen a hacerse pruebas en la capital de Emirato de Dubái y en Dallas (Texas, EE.UU.), dos ciudades congestionadas por el tráfico y con intereses decididos por invertir en esta tecnología. Pero será en 2025 cuando estos taxis aéreos sobrevuelen las ciudades, en una primera etapa de lanzamiento controlados por pilotos y posteriormente de forma autónoma.

# Panorama



El consejero del CSN, Fernando Castelló, en la clausura de la 44ª reunión anual de la sociedad Nuclear Española (SNE) celebrada en Ávila.

## El consejero Castelló clausura la 44ª reunión anual de la Sociedad Nuclear Española (SNE)

El consejero del Consejo de Seguridad Nuclear, Fernando Castelló, clausuró la 44ª reunión anual de la Sociedad Nuclear Española (SNE), celebrada en Ávila entre el 26 y 28 del pasado mes de octubre. También intervinieron en este acto de clausura el subdirector general de Energía Nuclear del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, José Manuel Redondo, así como el presidente y el vicepresidente de la SNE, José Antonio Gago (ENDESA), Javier Guerra (TECNATOM), y el delegado territorial en Ávila de la Junta de Castilla y León, José Francisco Hernández.

En su intervención, Fernando Castelló se refirió a la aprobación por el Pleno del CSN del Plan Estratégico del or-

ganismo para el periodo 2017-2022. Este documento considera novedades del entorno internacional y en el seno del propio CSN, así como los principales retos a afrontar en el entorno regulador a corto y medio plazo.

El consejero expuso las actuaciones del regulador para llevar a cabo la solicitud cursada desde el Ministerio para la Transición Ecológica el pasado 6 de julio, respecto a la suspensión temporal por parte del CSN de la emisión del informe preceptivo y vinculante sobre la autorización de construcción del Almacén Temporal Centralizado (ATC), e informó que en el momento de esta solicitud, el proyecto en el CSN tenía un grado de avance del 98 por ciento y en torno a 48.000 horas/persona.

Por otra parte, Castelló destacó la aprobación por el Pleno del CSN de la modernización de la Red de Estaciones Automáticas (REA). La Red actual está formada por 25 estaciones fijas automáticas de vigilancia radiológica ambiental. Después de 20 años de operación, se ha diseñado una nueva red con unas 200 estaciones fijas, ampliable con estaciones portátiles que pueden ser desplegadas en caso de emergencia en las zonas potencialmente afectadas. Esta nueva red, a diferencia de la actual, se ha diseñado para atender a situaciones de emergencia, aunque puede usarse para la vigilancia radiológica de todo el territorio nacional en situación de normalidad. ▶

## El CSN y su homólogo australiano firman un Memorando de Entendimiento

El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Fernando Marti, acompañado por todos los miembros del Pleno del organismo, y su homólogo australiano, Carl-Magnus Larsson, firmaron el pasado 22 de octubre un Memorando de Entendimiento entre el CSN y la Agencia Australiana para la Seguridad Nuclear y Protección contra la Radiación (ARPANSA, por sus siglas en inglés).

El acuerdo, firmado en la sede del CSN, supondrá un incremento de la colaboración entre el regulador español de la seguridad nuclear y protección radiológica y ARPANSA, estableciendo un marco de intercambio de información bilateral.

El ámbito de aplicación de cooperación bajo este memorando se basa en el flujo de información en materia de seguridad nuclear y la protección radiológica y se centra, entre otros aspectos, en la recuperación de terrenos contaminados, la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos, el licenciamiento de



El presidente del CSN, Fernando Marti, y su homólogo australiano, Carl-Magnus Larsson.

nuevas tecnologías en el ámbito del uso de radiaciones ionizantes en medicina y la regulación en la producción de radiofármacos.

nuevas tecnologías en el ámbito del uso de radiaciones ionizantes en medicina y la regulación en la producción de radiofármacos.

## Inaugurada la 8ª edición del Máster universitario en Ingeniería Nuclear y del Europeo en Energía Nuclear de la ETSEIB-UPC

El consejero del CSN, Javier Dies, catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), actualmente en excedencia, inauguró el curso académico 2018-2019 del Máster universitario en Ingeniería Nuclear (MNE, por sus siglas en inglés) y del Máster Europeo en Energía Nuclear (EMINE, por sus siglas en inglés) de la



Javier Dies, durante la inauguración del curso académico de los másters.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) – UPC. Durante el acto intervinieron también Gonzalo Carbó, en representación de Endesa; Carme Pretel, subdirectora jefe de Estudios de Ingeniería Industrial de la ETSEIB, y Lluís Batet, director de ambos máster.

La jornada comenzó con las presentaciones '*The nuclear Safety Council and Safety of nuclear Power Plants*', a cargo de Javier Díes, y '*Fighting climate change: the role of nuclear energy*', por parte del director general de energía nuclear de Endesa, Gonzalo Carbó.

Durante el acto, el consejero Dies entregó el premio Cátedra Argos del CSN al estudiante con mejor expediente académico de ambas titulaciones correspondiente al curso anterior. En su intervención, destacó que uno de los caminos para incrementar la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas se basa en incorporar en estas instalaciones, y en el organismo regulador, profesionales con una formación sólida en seguridad nuclear y protección radiológica.

## El CSN informa favorablemente la primera instalación de protonterapia en España

El Pleno del organismo regulador emitió, el pasado 12 de septiembre, el informe favorable a la primera instalación de protonterapia solicitada en España.

La protonterapia es una técnica avanzada de la radioterapia que emplea protones de alta energía. La característica de los protones es que la mayoría de su energía se deposita a una profundidad bien determinada, lo que permite aprovechar sus propiedades físicas y radiobiológicas en el tratamiento de algunos tipos de cáncer afectando mínimamente a los tejidos sanos adyacentes.

Esta instalación, ubicada en Madrid, es la primera de las dos previstas en España, hasta el momento, de esta especialidad oncológica. Además, está catalogada como instalación radiactiva de segunda categoría y consta de un sincrociclotrón, equipo que genera y acelera los protones hasta elevadas energías (entre 70 MeV y 230 MeV), y un sistema de guiado del haz generado de protones

(gantry) de grandes dimensiones que dirige la radiación a la zona del paciente a tratar

El CSN ha realizado una evaluación monográfica de los blindajes y especificaciones técnicas de funcionamiento del proyecto, tenido en cuenta referencias internacionales y aspectos de protección radiológica de diseño, construcción y operación así como de normativa aplicable a este tipo de instalaciones.

La alta energía de los protones empleados conlleva la existencia de campos de radiación neutrónicos muy superiores a los de las instalaciones de radioterapia existentes hasta ahora en España. El informe analiza el impacto radiológico que supone este nuevo tipo de instalaciones, incluidos los blindajes, la dosimetría, la activación de los materiales de construcción y de los equipos, y la gestión de los equipos y el personal. El CSN seguirá implicado en la evaluación, verificación e inspección de la instalación durante el montaje y puesta a punto. ▶



En la imagen, el equipo encargado de la verificación de la red de vigilancia radiológica de ámbito nacional y del control de los vertidos de Almaraz.

## Misión de verificación del Tratado Euratom de la red nacional de vigilancia radiológica ambiental

Una representación de la dirección general de Energía de la Comisión Europea (CE), compuesta por dos expertos, llevó a cabo una misión de verificación de la red de vigilancia radiológica de ámbito nacional, así como del control de los vertidos de la central nuclear Almaraz (Cáceres) y de la vigilancia radiológica del medio ambiente en su entorno.

Esta misión se desarrolló dentro del marco del artículo 35 de Euratom, que establece que cada Estado miembro de la Unión Europea “debe crear las instalaciones necesarias a fin de controlar de modo permanente el índice de radiactividad de la atmósfera, de las aguas y del suelo, así como el cumplimiento de las normas básicas. La Comisión tendrá derecho al acceso a estas instalaciones de control; podrá verificar su funcionamiento y eficacia”.

En cumplimiento de este artículo del tratado, la CE notificó a las autoridades españolas su intención de realizar esta misión de verificación, solicitando una exhaustiva información previa sobre todas las actividades de vigilancia y control radiológico desarrolladas en España y todas las organizaciones involucradas en su ejecución, a partir de la cual definió el alcance de la agenda a desarrollar.

Durante la misión, los expertos comunitarios contaron con la colaboración del CSN y específicamente con la presencia de inspectores de las subdirecciones de Protección Radiológica Ambiental y de Instalaciones Nucleares, con técnicos de la central nuclear de Almaraz, y por otras organizaciones que participan en la vigilancia radiológica ambiental y que colaboran con el organismo regulador en dicha materia, como la Junta de Extremadura y el laboratorio de radiactividad ambiental de la Universidad de Extremadura en Cáceres (Larux). ▶

## Simulacro de emergencia en la central nuclear de Cofrentes (Valencia)

La central nuclear de Cofrentes (Valencia) realizó en septiembre el preceptivo simulacro anual, conforme a los requerimientos establecidos en su Plan de Emergencia Interior (PEI), con la participación de la Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

La actuación del CSN se desarrolló desde la Sala de Emergencias de respaldo (SALEM 2), situada en el cuartel general de la Unidad Militar de Emergencias (UME) en Torrejón de Ardoz (Madrid), y desde el Centro de Coordinación Operativa (CECOP) de Valencia.

El organismo regulador realizó el seguimiento de la instalación y de las actuaciones del titular para la recuperación de las condiciones de seguridad y la adopción de medidas de protección radiológica.

El simulacro se inició a las 10.30 horas con la declaración



El Centro de Coordinación Operativa, durante el simulacro en Cofrentes.

de un incendio en la zona protegida de la instalación. Tras este suceso, se simuló también la intrusión de dos individuos en el edificio auxiliar de la central y otras dos intrusiones más que provocaron una explosión que afectó a los principales sistemas de seguridad de la planta.

## La vicepresidenta del CSN inaugura la jornada 'Preparación frente a emergencias nucleares y radiológicas: claves para la mejora'

La vicepresidenta del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Rosario Velasco, inauguró el pasado 21 de septiembre la jornada sobre 'Preparación frente a emergencias nucleares y radiológicas: claves para la mejora', que la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) organizó para los profesionales de este sector en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

Velasco comenzó su intervención agradeciendo a todas las instituciones presentes en la jornada su contribución y cooperación con el organismo regula-

dor y especialmente a la SEPR y al profesor de la Universidad Politécnica de Madrid Eduardo Gallego, co-organizador de la jornada.

La vicepresidenta del CSN subrayó la

importancia de protocolizar todos los aspectos organizativos de una emergencia y la coordinación entre todas las partes que participarían para resolverla con eficacia y rapidez. En este sentido, se mostró partidaria de la creación

de un grupo nacional para compartir información y promover actividades conjuntas en emergencias radiológicas y nucleares.

Asimismo expuso algunas consideraciones sobre el papel del CSN en las emergencias y sobre los aspectos transfronterizos y su tratamiento en el ámbito europeo (la iniciativa denominada HERCA-WENRA approach).



La vicepresidenta del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Rosario Velasco, en las jornadas organizadas por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR).

# Principales acuerdos del Pleno

## **A favor de la primera instalación de protonterapia en España**

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) emitió, el pasado 12 de septiembre, el informe favorable a la primera instalación de protonterapia en España. La protonterapia es una técnica avanzada de la radioterapia que emplea protones de alta energía. Esta instalación, ubicada en Madrid, es la primera de las dos previstas en España de esta especialidad médica. Está catalogada como instalación radiactiva de segunda categoría y consta de un sincrociclotrón que genera y acelera los protones hasta elevadas energías (entre 70 MeV y 230 MeV) y un sistema de guiado del haz generado de protones (gantry) de grandes dimensiones que dirige la radiación a la zona del paciente a tratar.

El regulador realizó una evaluación monográfica de los blindajes y especificaciones técnicas del proyecto, y tuvo en cuenta referencias internacionales y aspectos de protección radiológica de diseño, construcción y operación, así como de normativa aplicable a este tipo de instalaciones. La alta energía de los protones empleados conlleva la existencia de campos de radiación neutrónicas muy superiores a los de las instalaciones de radioterapia existentes hasta ahora en España. El informe analiza el impacto que supone este nuevo tipo de instalaciones, incluidos los blindajes, la dosimetría, la activación de los materiales de construcción y de los equipos, entre otros.

## **Informe favorable sobre la solicitud de modificación de diseño del ATI de la central nuclear Santa María de Garoña**

En su reunión del 25 de julio, el Pleno del CSN estudió la solicitud de autorización de la modificación de diseño para la puesta en servicio del Almacén Temporal Individualizado (ATI) de la central nuclear de Santa María de Garoña (Burgos), así como el in-

forme que, como consecuencia de las evaluaciones realizadas, efectuó previamente la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear.

El Pleno acordó informar favorablemente la solicitud mencionada, teniendo en cuenta los compromisos adquiridos por Nuclenor, S. A. y de cuyo cumplimiento deberá ser informado el CSN.

## **Aprobado el programa de actividades para la suspensión de la emisión del informe sobre la construcción del ATC**

El Pleno del CSN aprobó por unanimidad el plan presentado para paralizar la emisión de los informes de evaluación relativos a la solicitud de autorización de construcción en Villar de Cañas (Cuenca) del Almacén Temporal Centralizado (ATC) de combustible nuclear gastado, y proceder a documentar ordenadamente las actuaciones realizadas hasta la fecha o en curso, de forma que se mantenga todo su valor para el mejor aprovechamiento futuro.

El CSN ha empleado hasta la fecha, en las evaluaciones relativas a la solicitud de autorización de construcción del ATC, unas 43.000 horas de personal técnico propio del organismo, así como otras 4.900 horas de personal externo contratado, y ha alcanzado un grado de avance de aproximadamente el 98 por ciento de los trabajos inicialmente planificados.

El plan de la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear recoge y resume el estado actual de las actividades de evaluación asociadas a la autorización de construcción del ATC y establece el cronograma de acciones necesarias para documentar las tareas realizadas y para hacer efectiva la interrupción de las mismas.

## **Informe a favor de la modificación del ATI de Almaraz I y II**

El pleno del CSN, en su reunión del 4 de julio de 2018, estudió la petición de informe

sobre la solicitud de modificación de diseño para la puesta en servicio del Almacén Temporal Individualizado (ATI) de las Unidades I y II de la central nuclear de Almaraz y de aprobación de los cambios a los Documentos Oficiales de Explotación afectados por la modificación y presentada por las centrales nucleares Almaraz-Trillo.

El objeto de esta solicitud es resolver las necesidades de almacenamiento del combustible gastado en el emplazamiento de la central nuclear de Almaraz hasta que sea posible su traslado al Almacén Temporal Centralizado (ATC). El Pleno estudió la solicitud y acordó informarla favorablemente en cumplimiento del apartado b) del artículo 2º de la Ley 15/1980 de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.

## **Informe de la documentación de BME sobre el proyecto de almacenamiento de residuos radiactivos en la Zona 7**

El pasado 25 de julio, el Pleno del CSN estudió la solicitud sobre la justificación radiológica de la práctica que pretende llevar a cabo Berkeley Minera España (BME), de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos en un determinado hueco minero. Previamente, el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital había consultado al CSN sobre esta práctica en dos ocasiones.

El Pleno estudió la solicitud del ministerio y el informe que, en el ámbito de sus competencias, realizó la Dirección Técnica de Protección Radiológica y acordó emitir un informe sobre el proyecto de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos en una explotación minera de la provincia de Salamanca. El proyecto, denominado Zona 7, prevé la explotación del mineral de uranio del depósito de dicha zona, que se tratará en la instalación radiactiva de primera categoría del ciclo de combustible Planta Retortillo.

# Monografías, en la web del CSN

Entre los diferentes apartados que se pueden consultar en la *home* del Consejo Regulador, se encuentra el Centro de documentación, entre cuyos epígrafes se incluye la sección de Monografías, que cuenta con documentos con una completa información sobre diferentes temas.

Es el caso de los ‘Residuos radiactivos’, que se analizan en

la sección Radiografía de este número de la revista Alfa, y cuya información puede ampliarse en con esta monografía.

## Ruta en 4 pasos para consultar las monografías

**1** Centro de documentación

**2** Documentos de monografías

**3** Residuos radiactivos (Monografía)

**4** Residuos radiactivos (Monografía)

PDF

(1.) A través de la pestaña **CENTRO DE DOCUMENTACIÓN** de la home de la web se accede a una sección (2.), **DOCUMENTOS DE MONOGRAFÍAS**, donde, entre las diferentes opciones publicadas, se llega a **RESIDUOS RADIATIVOS**. (3.) En esta sección de la web del CSN se pueden consultar y descargar en formato PDF todos los documentos, de forma completamente gratuita.

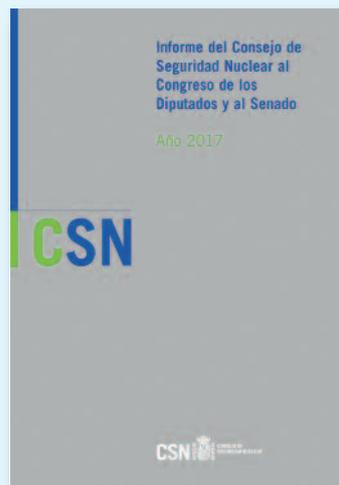
**Para todas las pantallas y 'smartphones'.** La web del CSN destaca por su usabilidad y su diseño *responsive*, que se adapta a todas las pantallas y terminales inteligentes, desde los que también se pueden consultar las monografías.

# Publicaciones



**Programas de vigilancia radiológica ambiental**  
Resultados 2016

**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado**  
Año 2017



**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado**  
Resumen del año 2017



**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado**  
Resumen del año 2017

**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](mailto: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 T waves: Electromagnetic waves that see all

Terahertz radiation is one of the few ranges of the electromagnetic spectrum that has not yet been used for practical applications. This situation is changing and it is calculated that over the coming decade it may contribute important innovations in medical imaging technologies, telecommunications or quality control systems for new materials such as graphene.

### 23 Kagome metal, exotic material for quantum electronics

As from today, Japanese basket weaving and quantum mechanics have in common a name and a pattern. Kagome baskets are manufactured using strips of bamboo in a symmetrical pattern of intertwined triangles that share their corners, and are one of the traditions of Japanese culture. This pattern has caught the eye of the scientific community and given rise to the following hypothesis: the atoms of a metal or some other conducting substance might be organised following its bonds, obtaining a material with exotic quantum electronics properties.

### 32 Henri Becquerel: The seed of the atom

A constant that is repeated time and time again throughout the history of science is that of chance being a key element in the achievement of certain discoveries. The discovery of penicillin by Alexander Fleming would be the best-known case, although the discovery of radioactivity by Henri Becquerel would not be far behind. These cases would appear to point to certain of our most illustrious scientists as being fortunate individuals who one fine day found the key to glory and the Nobel Prize waiting for them on their desk. One line of thought is that any of their colleagues might have come up with the same results if they had been blessed with the same stroke of luck.

### 40 On-going revolution in the struggle against cancer

The use of radioactive isotopes for the diagnosis and treatment of pathologies has changed our way of combatting cancer. We refer to nuclear medicine, a field with decades of history that is now striving to become increasingly effective and innocuous. A clear indication of the success of nuclear medicine is to be found in its current clinical relevance: it is estimated that one of every two persons will benefit from it at some time in their life.

## RADIOGRAPHY

### 38 Management and classification of low and intermediate level waste.

## INSIDE THE CSN

### 20 Technical office of the presidency (GTP): more than just the image and relations of the CSN

An organisation such as the Nuclear Safety Council, whose mission is to ensure nuclear safety and radiological protection in the country, is aware of the repercussion of this subject. In addition to technical issues, the Council also performs an important task with respect to the outside world. The Technical Office of the Presidency is in charge of coordinating and driving different strategies, such as promoting national and international institutional contacts and providing robustness for the image of the organisation, as well as transparency and credibility.

## INTERVIEW

### 14 Mariano Barbacid, biochemist and cancer researcher

“What we call cancer is in fact a series of illnesses as diverse as infectious diseases, or even more so”.

## TECHNICAL ARTICLES

### 27 Knowledge Management

Knowledge management is defined as an integrated and systematic approach aimed at identifying, managing and sharing the knowledge of an organisation and allowing groups of people to collectively generate new knowledge in order to facilitate the achievement of the organisation's objectives. This is an issue that the CSN has been addressing since 2014, through the project known as RECOR.

### 48 Refuelling activities at nuclear power plants

Nuclear power plants need to periodically shut down their power production to remove the fuel that has been burned up throughout the cycle and insert fresh fuel assemblies allowing the facility to operate at full power over a new cycle. This activity is known as the 'Refuelling Outage' and involves manoeuvres such as the unloading of the reactor vessel, this requiring access to the containment and to other areas that are normally restricted during normal operation.

- 61 Chain reaction
- 64 Panorama
- 68 Plenary Agreements
- 69 csn.es
- 70 Publications



# Súmate a los 135.000

Desde su inauguración en 1998, los 135.000 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](http://www.csn.es/index.php/es/centro-informacion) o pide cita en [centroinformacion@csn.es](mailto:centroinformacion@csn.es)  
Súmate a los 135.000.