

## Robots para ambientes extremos

Indicaciones de defectos  
en las centrales de Döel 3  
y Tihange 2

Mónico Sánchez, el español  
que inventó el aparato  
de rayos X portátil

### Nueva sección *El CSN por dentro*

Cómo es y quiénes  
forman la Dirección  
Técnica de Protección  
Radiológica





**Toda la información sobre seguridad nuclear  
y protección radiológica,  
de la mano del organismo regulador**



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

# Protagonistas

A pesar del intenso ejercicio de información, divulgación y transparencia que el Consejo de Seguridad Nuclear realiza, y del que esta revista es buena muestra, el organismo es poco conocido por el público general, y con frecuencia se confunden las funciones que tiene encomendadas. Incluso buena parte de quienes lo saben desconocen su estructura interna, su funcionamiento y, sobre todo, a las personas que hacen posible llevar a cabo su misión, los auténticos protagonistas del trabajo del Consejo. Para atajar ese desconocimiento, *Alfa* inaugura una nueva sección, denominada “El CSN por dentro”, que pretende abrir puertas y derribar muros simbólicamente para mostrar, departamento a departamento, qué funciones cumple cada uno de ellos, quienes los integran y cómo trabajan. Para empezar, nos acercamos a una de las dos direcciones técnicas, la de Protección Radiológica, dirigida por María Fernanda Sánchez Ojanguren.

Abre la revista un reportaje sobre el desarrollo de robots capaces de realizar tareas de todo tipo en ambientes hostiles al ser humano. El accidente de Fukushima puso de manifiesto la necesidad de disponer de estos humanoides dotados de facultades humanas tan simples como subir y bajar escaleras, conducir un

vehículo, abrir y cerrar compuertas, ventanas y válvulas, encajar una llave en la cerradura y girarla, detectar y retirar obstáculos, reaccionar ante imprevistos y apretar un botón. La agencia de investigación militar estadounidense, DARPA, ha convocado un concurso para elegir el prototipo que mejor cumpla estos objetivos y sea útil en todo tipo de circunstancias.

*“El CSN por dentro”  
pretende mostrar  
qué funciones cumple  
cada departamento,  
quienes lo integran  
y cómo trabajan*

Hace un siglo regresaba a España, tras hacer fortuna en EE. UU., Mónico Sánchez, un manchego de familia humilde fascinado por la electricidad, que se embarcó rumbo a Nueva York para estudiar esa tecnología. Allí obtuvo el título de ingeniero y se hizo inventor, ideando, entre otras cosas, el primer aparato

de rayos X portátil del mundo. *Alfa* recuerda la peripecia de aquel pionero de la electrotecnia olvidado durante decenios. Otro reportaje nos acerca al mundo de los virus, seres a mitad de camino entre lo vivo y lo inerte, principales causantes de las enfermedades infecciosas, que siguen siendo la primera causa de muerte en el mundo. Y otro nos permite descubrir uno de los efectos colaterales del cambio climático: la acidificación de los océanos por la acumulación de dióxido de carbono.

Dentro de la parte más técnica de la revista, incluimos un artículo sobre el análisis de los defectos detectados en las vasijas de las centrales belgas de Döel y Tihange y las lecciones extraídas del mismo. Otro artículo está dedicado al riesgo de cáncer secundario por radioterapia. También pasamos revista a la actividad tecnológica que lleva a cabo la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Enresa. Además, incluimos una breve entrevista reportajeada con Yotaro Hatamura, presidente de la Comisión de Investigación del Accidente de Fukushima. Por último, entrevistamos también a Ramón Núñez, pionero de la museología científica interactiva en España, que acaba de jubilarse como director del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología. 

## ALFA

Revista de seguridad nuclear  
y protección radiológica  
Editada por el CSN  
Número 23 / I trimestre 2014

### Comité Editorial

Fernando Martí Scharfhausen  
Antonio Munuera Bassols  
Fernanda Sánchez Ojanguren  
Enrique García Fresneda  
Ángel Laso D'Iom  
Manuel Toharia Cortés  
Ignacio Fernández Bayo

### Comité de Redacción

Ángel Laso D'Iom  
Concepción Muro de Zaro

Natalia Muñoz Martínez

Antonio Gea Malpica  
Manuel Aparicio Peña  
Ignacio Fernández Bayo

### Edición y distribución

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

### Coordinación editorial

Divulga S.L.  
Diana, 16 - 1º C  
28022 Madrid

### Fotografías

CSN, Divulga, Javier Fernández,  
iStockphoto y Depositphotos

### Impresión

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

### Fotografía de portada

Darpa

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



### 4 Robots al rescate

Los robots se utilizan desde hace años para realizar trabajos peligrosos y moverse por zonas inhóspitas, pero en Fukushima se pusieron de manifiesto las limitaciones que aún tienen. Por eso, la agencia de investigación militar estadounidense ofrece dos millones de dólares al robot capaz de utilizar todo tipo de herramientas necesarias para intervenir eficazmente en un desastre.

### 21 Los muertos vivos

La capacidad evolutiva de los virus hace que surjan continuamente nuevas enfermedades infecciosas. Hoy sabemos que nunca podremos eliminarlos, pero sí limitar sus efectos, tratarlos con nuevos medicamentos y prevenirlos mediante vacunas. Los rayos X nos permiten verlos y estudiar mejor su comportamiento.



### 31 Un Edison a la española

Un libro de Manuel Lozano Leyva, catedrático de Física Nuclear, recupera la memoria de Mónico Sánchez, un manchego de origen humilde que se hizo ingeniero eléctrico e inventor en Estados Unidos, en la brillante época de Edison y Tesla. Desarrolló el primer aparato portátil de rayos X y regresó como pionero de la electrotecnia en nuestro país.

### 54 Enresa, tecnología de largo plazo

Nacida en los años 80 para gestionar los residuos radiactivos, Enresa es hoy un referente mundial en este ámbito, gracias a la instalación de El Cabril para almacenar residuos de media y baja radiactividad. Ahora, se enfrenta al reto de tener listo, antes del fin de 2017, el Almacén Temporal Centralizado para residuos de alta actividad de Villar de Cañas (Cuenca).



### 58 Gastritis marina

La acumulación en la atmósfera del dióxido de carbono por la combustión de recursos fósiles no solo amenaza con alterar el clima; además, la absorción de este gas por el agua de los mares está provocando una acidificación creciente de los océanos. Los últimos estudios indican que podría aumentar en un 170 % durante este siglo, con dramáticas consecuencias sobre la vida marina.

### 18 EI CSN POR DENTRO

Esta nueva sección de la revista Alfa se inaugura mostrando cómo es y cómo funciona la Dirección Técnica de Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear, a través de sus protagonistas, los técnicos y empleados que desarrollan su labor en este departamento clave del organismo regulador.

## 48 RADIOGRAFÍA

Piscinas de almacenamiento de combustible gastado.

### ENTREVISTAS

#### 28 **Yotaro Hatamura, presidente de la Comisión de Investigación del Accidente de Fukushima**

“En Japón no hay un regulador nuclear independiente y seguirá sin haberlo en el futuro”.

#### 43 **Ramón Núñez Centella, exdirector del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología**

“La educación científica en la escuela sigue siendo la gran asignatura pendiente”.

### ARTÍCULOS TÉCNICOS

#### 9 **Indicaciones de defectos en las centrales Döel 3 y Tihange 2**

Los defectos detectados en las vasijas de las centrales nucleares belgas de Döel 3 y Tihange 2 han ofrecido lecciones muy importantes para la mejora de las prácticas reguladoras y la colaboración internacional, como la posibilidad de disponer de la información original del diseño de los componentes críticos y de reforzar la inspección independiente durante su fabricación.

#### 36 **Protección del paciente en radioterapia: riesgo de un segundo cáncer por la radiación periférica**

Los tratamientos de radioterapia tienen efectos secundarios como consecuencia de la radiación periférica. Este problema apenas se ha considerado a la hora de elegir la mejor estrategia de tratamiento, pero ahora un grupo de investigadores, liderado por la Universidad de Sevilla, ha abordado la cuestión desde la física básica hasta la solución clínica, y propone mecanismos para evitar el problema o al menos reducirlo.



|    |                           |
|----|---------------------------|
| 50 | <b>Reacción en cadena</b> |
| 64 | <b>Panorama</b>           |
| 67 | <b>Acuerdos del Pleno</b> |
| 68 | <b>El CSN informa</b>     |
| 71 | <b>csn.es</b>             |
| 72 | <b>Publicaciones</b>      |

El desastre de Fukushima impulsa el desarrollo de máquinas capaces de realizar tareas complejas en ambientes inaccesibles para los humanos

## Robots al rescate

Los robots llevan medio siglo con nosotros y en ese tiempo han invadido los centros industriales y se han dejado asomar por algunos ámbitos más. Desde hace algunos años, se utilizan también para realizar trabajos especialmente peligrosos o para moverse por zonas inhóspitas, de acceso difícil o imposible para los seres humanos. A pesar de la creciente sofisticación de estas máquinas, no existía ninguna que pudiera mitigar las consecuencias de los sucesos ocurridos en Fukushima tras el *tsunami* de marzo de 2011. Por eso, la agencia de investigación militar estadounidense ofrece dos millones de dólares a quien fabrique un robot capaz de utilizar todo tipo de herramientas necesarias para intervenir eficazmente en un desastre.

■ Texto: **Manuel Ansele** | periodista científico, redactor de *Materia* ■

**E**staba en la vanguardia de la tecnología, pese a que era más lento que una tortuga. Sus cuatro patas eran capaces de transportar sus 65 kilogramos de peso a una velocidad de un metro por minuto. Y sus motores hacían un ruido infernal. “Pero fue el primer robot caminante que se hizo en España”, recuerda el padre de la rudimentaria criatura, el físico Pablo González de Santos, señalando los restos de la máquina, que hoy descansan en un minimuseo en el Centro de Automática y Robótica, en Arganda del Rey (Madrid).

Era *Rimho*, acrónimo de Robot de Intervención en Medios Hostiles, desarrollado en 1993. González, investigador del CSIC, recuerda casi con nostalgia que

El robot humanoide *Thor*, de la Universidad Virginia Tech (EEUU).



todos los motores del robot estaban alojados en su cuerpo, por lo que sus patas eran esbeltas y ligeras. Estaba pensado para moverse de manera lenta y elegante por entornos nucleares, gracias a la colaboración del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), pero se quedó en un prototipo. “No llegamos a prepararlo para que soportara ambientes radiactivos”,

liberación de radiactividad tras el suceso, que no llegó a provocar el aumento de los casos de cáncer en la zona según un estudio de la Universidad de Pittsburgh, disparó el miedo a los accidentes en las plantas atómicas y contribuyó a intensificar la búsqueda de robots capaces de trabajar en entornos radiactivos.

Dos décadas después de *Rimho*, los robots diseñados para actuar en condi-

“un algoritmo que permite al robot caminar por superficies irregulares, evitar obstáculos y subir escaleras, asegurando el acceso a áreas difíciles de alcanzar por robots con ruedas o tractores”, según la compañía.

El científico Alexander Sprowitz, de Biorob, un laboratorio de biorrobótica de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza), explica la complejidad de

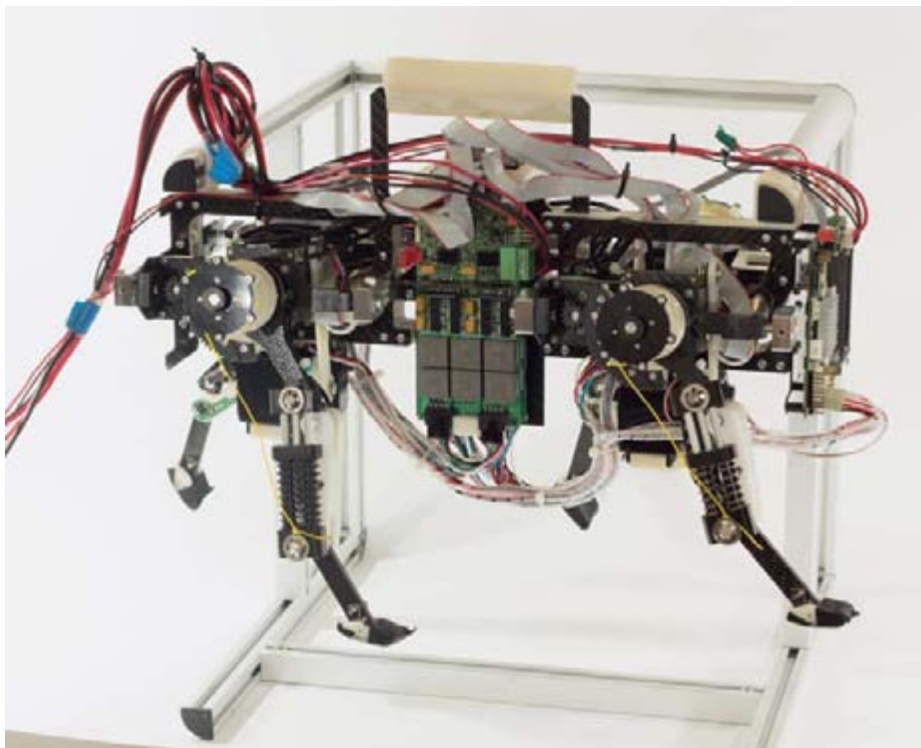


Robot de Intervención en Medios Hostiles (*Rimho*), desarrollado por el CSIC en 1993.

reconoce González ante la vitrina que separa a esta reliquia de la robótica de las manos de los visitantes. A su alrededor, dos de sus colaboradores prueban unos tractores con tecnología punta, que pueden circular sin conductor, guiados por vehículos aéreos no tripulados.

Sin embargo, *Rimho*, que hoy parece un trasto, no fue un esfuerzo inútil. El robot “sirvió para la validación de modos de caminar periódicos” para cuadrúpedos y se utilizó para “la evaluación de máquinas caminantes para la detección y localización de minas antipersona”, según resumió el equipo de González en un informe sobre los robots caminantes y escaladores del CSIC.

El obsoleto cacharro es fruto y testimonio de una época. El 28 de marzo de 1979, la central nuclear de Three Mile Island, en Harrisburg (EEUU), sufrió la fusión parcial del núcleo de uno de sus reactores. Fue el accidente nuclear civil más grave de la historia hasta que llegó el desastre de Chernóbil en 1986. La



El robot *Oncilla* reproduce los movimientos de un gato.

ciones extremas pueden parecerse estéticamente a sus ancestros, pero sus propiedades pulverizan las marcas de los pioneros. Frente a los 60 metros por hora que recorría la máquina española, el último robot cuadrúpedo de la empresa japonesa Toshiba, también de 65 kilogramos, alcanza los 1.000 metros por hora. Y, a diferencia de *Rimho*, sí está preparado para soportar elevadas dosis de radiación como las de la central nuclear de Fukushima, arrasada por un tsunami el 11 de marzo de 2011.

El cuadrúpedo de Toshiba, con patas multiarticuladas, está controlado por

adaptar un robot a ambientes radiactivos. Sprowitz es el creador de *Cheetah-cub*, un robot cuadrúpedo experimental que reproduce “fielmente” los movimientos de “un gato o un cachorro de guepardo” y está pensado para participar en misiones de rescate o de exploración. Este experto también es padre del *Oncilla*, un modelo sucesor del *Cheetah-cub* que se emplea para estudiar los movimientos de los mamíferos.

“Adaptar robots como *Cheetah-cub* y *Oncilla* a ambientes radiactivos requeriría fortalecer su *hardware* y su electrónica. Para soportar la alta radiación, hay

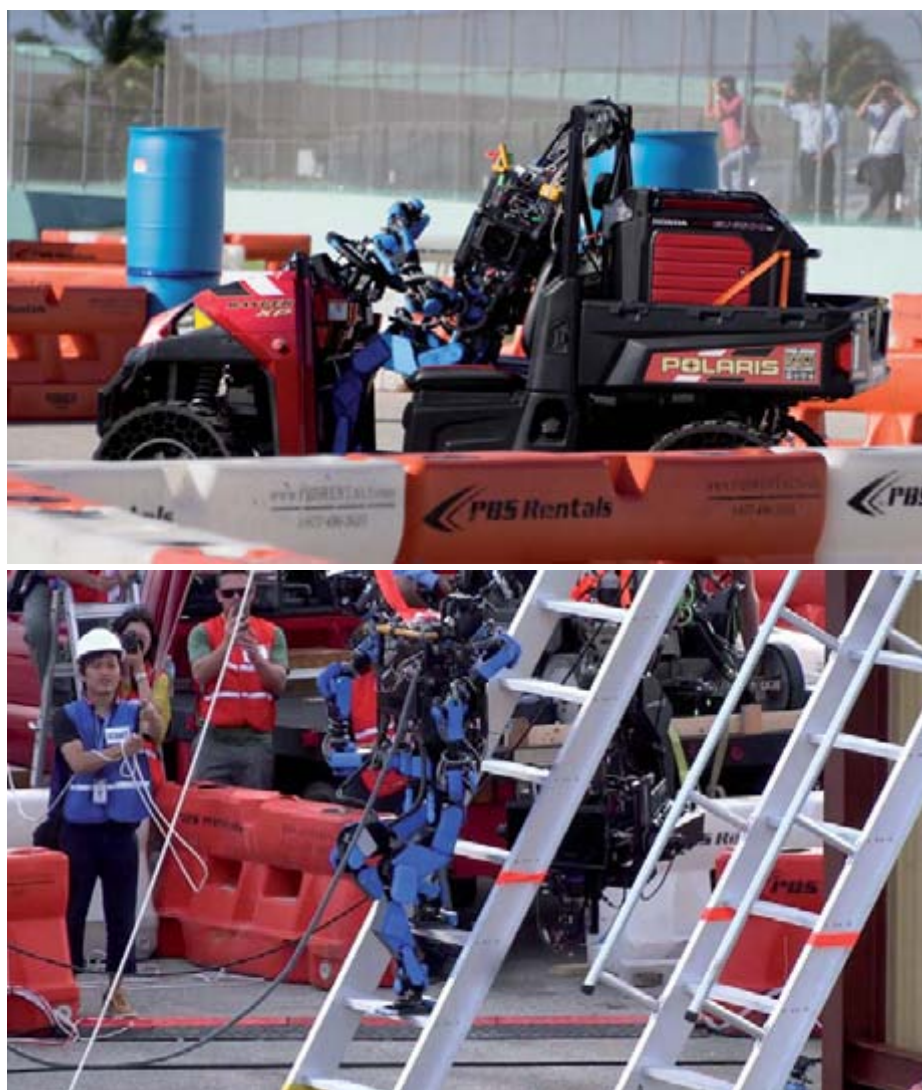
que cambiar los materiales, blindarlos y además se necesitan componentes eléctricos específicos”, explica Sprowitz.

“Ese fortalecimiento de los robots mediante blindaje y cambio de piezas tendría como resultado un robot mucho más pesado. Sería un desafío desde el punto de vista de la ingeniería, y requeriría recursos económicos significativos y muchos ingenieros para diseñar un robot adecuado para ambientes radiactivos”, apunta el experto.

De hecho, el desafío del que habla Sprowitz es tan mayúsculo que la agencia de investigación militar de EE. UU., la siempre sorprendente DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), pagará dos millones de dólares al equipo que desarrolle robots capaces de sustituir a los humanos en desastres como el accidente nuclear de Fukushima. El ganador tendrá que ser un robot “con la capacidad de utilizar las herramientas humanas que estén disponibles, desde herramientas de mano a vehículos”, según la nota de lanzamiento de la iniciativa.

“En Fukushima, en las primeras 24 horas, las explosiones no habrían ocurrido si hubiera sido posible ventear los reactores [liberar de manera controlada los gases acumulados para disminuir la presión]”, afirmó Gill Pratt, experto en robótica de DARPA, en una rueda de prensa en julio. “Los seres humanos trataron de hacerlo, pero se tuvieron que dar la vuelta porque sus dosímetros marcaban una radiación demasiado alta. Esperamos desarrollar máquinas que puedan intervenir y ayudar a disminuir la gravedad de un desastre”, proclamó.

El reto es formidable. Las exigencias de DARPA parecen casi imposibles de satisfacer. Los robots tendrán que ser capaces de conducir coches, caminar entre escombros, retirar obstáculos que taponen una entrada, abrir puertas, subir escaleras, utilizar herramientas para



El robot *Schaft* puede conducir y bajar escaleras.

romper paredes de hormigón, buscar y cerrar una válvula cerca de una fuga en una tubería y, por último, conectar y emplear una manguera de bomberos. El ganador se conocerá tras un último duelo de robots en diciembre de 2014.

Siempre con Fukushima en mente, Pratt recordó que tras el accidente se utilizaron camiones de bomberos, conducidos por operarios, en zonas de la central sometidas a altas dosis de radiación. Para el científico de DARPA, el objetivo debería ser que en el futuro, si ocurre un desastre semejante, ningún ser humano tenga que exponerse de esa manera. El reto de la agencia estadounidense nace directamente de una constatación: en

marzo de 2011, con kilómetros de su costa arrasados por el *tsunami* y la central de Fukushima descontrolada, Japón, considerado el país líder en la creación de robots humanoides, se percató de que no tenía andróides que pudieran sustituir a los humanos en el campo de batalla contra las fugas radiactivas.

Los equipos de investigación que participan en el desafío de DARPA no empiezan de cero. La agencia militar de EEUU ha proporcionado a los siete que más han despuntado en las primeras pruebas virtuales un robot *Atlas* diseñado por la empresa estadounidense Boston Dynamics, ampliamente reconocida como la mejor del sector. La

compañía, históricamente financiada por el Pentágono y adquirida el pasado diciembre por Google, ha creado robots punteros, como *Big Dog*, una máquina cuadrúpeda del tamaño de una pequeña mula, que puede correr por terrenos escarpados a 6,5 kilómetros por hora, transportando cargas de más de 150 kilogramos.

También es creación suya *Petman*, un robot antropomorfo supuestamente diseñado solo para probar ropa de protección química. *Petman* es asombroso: sus movimientos son tan humanos que pone los pelos de punta. Hasta puede ponerse en cuclillas. Y suda dentro del traje para simular de manera realista las



DARPA

*Big Dog* corre por terrenos escarpados a 6,5 km/h.

## Humanoides, simios e insectos

La agencia DARPA publicó una imagen para publicitar su desafío. Mostraba a dos robots perfectamente antropomorfos. Uno de ellos manejaba una herramienta de mano para romper un muro de hormigón, mientras el otro cerraba una válvula de una tubería, en un escenario de accidente industrial con explosiones y escapes tóxicos. Sin embargo, la propia agencia advertía: “La forma de estos robots es sólo ilustrativa. Los robots deben ser compatibles con operarios, entornos y herramientas humanos, pero no hay ninguna exigencia de que tengan forma humanoide”. No obstante, así ha sido en la gran mayoría de los casos. Parece que los investigadores creen que, para sustituir a un humano, lo mejor es precisamente una máquina con forma de humano.

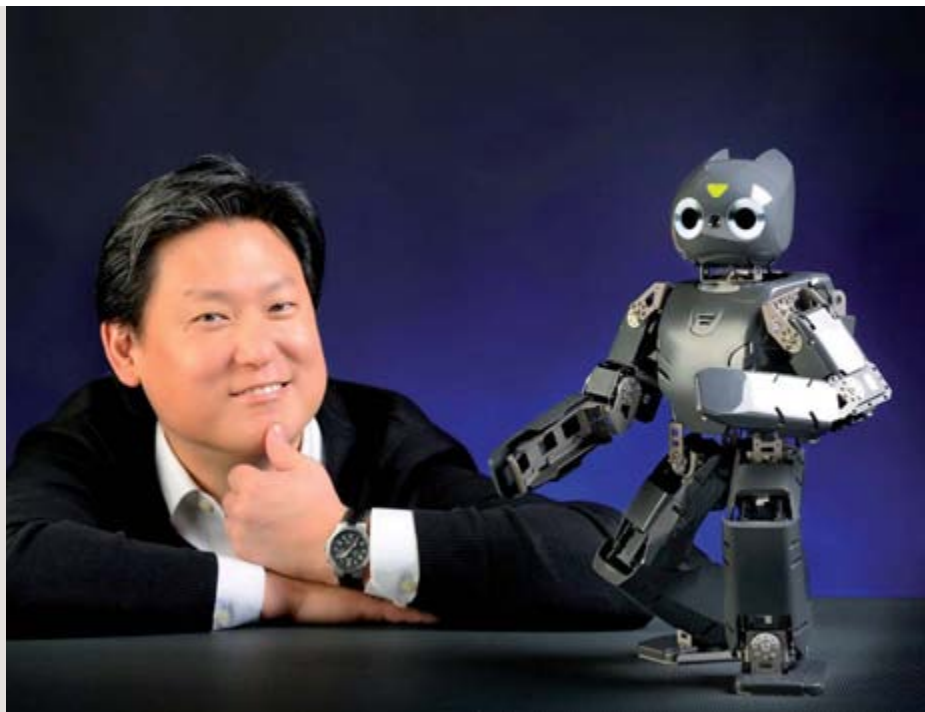
Algunos equipos de ingenieros se han salido de la norma humanoide. El Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA ha diseñado un robot con forma de simio, el *Robo-Simian*, cuyas cuatro patas servirán para desplazarse, pero también para manipular objetos. Mide 1,64

metros a dos patas y pesa más de 100 kilogramos. Otro equipo, el Mojavatón, formado por profesores de la Universidad de Colorado Mesa en Grand Junction (EE. UU.), propone un robot de cuatro patas y dos brazos, bautizado como *Buddy*. Está elaborado con metal y piezas de plástico salidas de una impresora 3-D para aligerar su peso, que apenas alcanza los 17 kilogramos. Finalmente, el robot *Chiron*, creado por la empresa estadounidense Kairos Autonomi, camina con seis patas, como un insecto. ▶



DARPA

Imagen promocional del desafío robótico de la agencia Darpa.



Robot *Atlas* de Boston Dynamics. A la derecha, Dennis Hong, profesor de ingeniería Mecánica en Virginia Tech y líder del equipo THOR.

condiciones de un soldado en el campo de batalla.

El robot que se ha entregado a los siete mejores participantes en el desafío también es muy sofisticado. *Atlas*, con forma humanoide, puede caminar con sus dos piernas, y tiene las extremidades superiores libres para transportar o manipular objetos. En su cabeza lleva múltiples sensores láser y cámaras de vídeo. Es “un robot en busca de un cerebro”, en palabras de uno de los equipos ganadores en la primera fase, el ViGIR, formado, entre otros, por investigadores de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania) y de la Universidad de Virginia Tech, en Blacksburg (EE. UU.). A comienzos de diciembre, los ingenieros presentaron en sociedad su *Atlas* modificado, al que han bautizado *Florián*, en alusión al santo cristiano patrón de los limpiadores de chimeneas y de los bomberos.

“El objetivo es diseñar herramientas, algoritmos y procedimientos que puedan ser utilizados para permitir a un robot humanoide y a operarios humanos trabajar juntos y actuar en un desastre en

el mundo real, de manera rápida y efectiva, sin necesidad de que el robot sea completamente autónomo”, ha declarado Doug Bowman, director del Centro de Interacción Humano-Ordenador en Virginia Tech y colíder del equipo ViGIR.

En su presentación al mundo, el robot *Florián*, con un *software* desarrollado por el equipo ViGIR, se tambaleó y estuvo a punto de caerse en varias ocasiones. Pocos días después, entre el 20 y el 21 de diciembre, fue uno de los participantes en Homestead (EE. UU.) en uno de los torneos preliminares del desafío organizado por DARPA. Se enfrentaron 16 equipos, media docena de ellos también con robots *Atlas* y el resto con robots propios. “Este podría ser el desafío robótico más ambicioso de la historia”, afirmó Jesse Hurdus, otro de los miembros del equipo.

El ganador fue el increíble *Schaft*, desarrollado por la empresa japonesa *Schaft*, también adquirida recientemente por Google. Es bípedo, mide 1,48 metros y sus brazos se mueven con mayor

agilidad que los de sus contrincantes, gracias a una nueva tecnología de motores.

Para conocer otro de esos robots propios que compiten en el desafío de DARPA no hace falta salir de la Universidad de Virginia Tech. Allí, el equipo THOR ultima un robot humanoide del mismo nombre, que posee una “gama de movimientos sobrehumana” y “una interfaz de usuario intuitiva”; una de las exigencias de DARPA. En caso de desastre, los robots deben poder desplegarse por la zona rápidamente y ser controlados por personal con poco entrenamiento.

“Nosotros creemos de verdad que esta es la razón por la que hacemos robótica: desarrollar la tecnología que salvará al mundo. Aunque se trata de una competición con grandes premios en efectivo en juego, ganar no es lo más importante”, afirma Dennis Hong, profesor de ingeniería mecánica en Virginia Tech y líder del equipo THOR. “Ganemos o perdamos, si la tecnología que desarrollamos en este proyecto puede salvar aunque solo sea la vida de una persona en el futuro, todo habrá valido la pena”. ©

Transcurrido poco más de un año desde el accidente de Fukushima, un nuevo acontecimiento ponía en alerta a los organismos reguladores encargados de la seguridad nuclear. Casi un año más tarde, tras miles de horas invertidas y, a la vista de los resultados de los análisis realizados en las vasijas de las centrales de Döel 3 y Tihange 2, el organismo regulador belga autorizó el arranque de los reactores afectados, aunque requiriendo algunas acciones a corto y medio plazo. Las distintas organizaciones que participaron en el proceso coinciden en afirmar que hay una serie de lecciones aprendidas muy importantes. Una de tipo general, sería la importancia de la colaboración internacional en situaciones no

incluidas en las prácticas reguladoras estándar. En aspectos más concretos, es la importancia de disponer de la información original del diseño de los componentes críticos, y de reforzar el papel de la “inspección independiente” durante su fabricación de los mismos. En marzo de este año y ante los inesperados resultados preliminares de unos ensayos mecánicos adicionales incluidos en las acciones a medio plazo requeridas por FANC, Electrabel ha adelantado la parada por recarga de ambos reactores para analizar las posibles consecuencias. ■ Texto: **Eduardo Mas García** | Jefe del Área de Ingeniería Mecánica y Estructural ■ **Carlos Anta Redondo** | Técnico del Área de Ingeniería Mecánica y Estructural ■

El CSN ha participado en los grupos de trabajo que asesoraron al organismo regulador belga para la evaluación de las vasijas afectadas

## Indicaciones de defectos en las centrales de Döel 3 y Tihange 2



Centrales nucleares de Döel (arriba) y Tihange.

**D**urante la parada por recarga que tuvo lugar en junio de 2012 en la unidad 3 de la central belga de Döel, se realizaron, por primera vez, una serie de inspecciones en la vasija del reactor. Estas se hicieron conjuntamente con las requeridas por su programa de Inspección en Servicio (ISI en sus siglas en inglés). (Ver cuadro de texto en la página 15). El objetivo de dichos exámenes era descartar la existencia de los llamados defectos bajo *cladding*<sup>1</sup> en la zona de la *beltline*<sup>2</sup> de la vasija del reactor (ver figura 1 en la página siguiente), acerca de los cuales existía cierta preocupación a raíz de una experiencia en la central nuclear francesa de Tricastin. Esta zona de las vasijas es la más expuesta a la irradiación neutrónica y, por tanto, la más susceptible de ver reducidas las propiedades mecánicas del material base.

La inspección en servicio de los componentes críticos en las centrales nucleares de Bélgica (al igual que en España) se realiza de acuerdo con los requisitos especificados en la sección XI del Código ASME<sup>3</sup>, que para la vasija está limitada a las soldaduras circunferenciales que unen las diferentes virolas (anillos) y las zonas próximas a ellas, denominada *zona afectada térmicamente* (ZAT) y que incluye parte del material base. El código indica que se debe examinar todo el perímetro y el 100 % del espesor a lo largo de una franja más ancha que el propio cordón de soldadura. Para la realización de los ensayos que se habían planificado en Döel, con el objetivo de detectar posibles defectos bajo el plaqueado, se utilizó un procedimiento de inspección por ultrasonidos especialmente calificado para esa labor. Se examinó la zona de la *beltline* de

la vasija en toda la longitud circunferencial y los primeros 25 mm de espesor de la cara interna. La altura de inspección cubrió toda la longitud del núcleo.

Los análisis desvelaron unos resultados inesperados para el titular de la central nuclear ya que, si bien no se detectaron defectos bajo el *cladding*, los ensayos revelaron una serie de *indicaciones*<sup>4</sup> que inicialmente no fueron capaces de identificar. Por esta razón, fue necesaria una inspección suplementaria para intentar determinar y caracterizar los defectos encontrados, así como buscar otros nuevos, si los hubiera. Para esta nueva situación se hizo uso de los equipos de ultrasonidos que estaban disponibles en la planta durante la recarga, que son utilizados habitualmente para cumplir con los mandatos de ASME XI. Además, se inspeccionaron de nuevo las tres virolas forjadas de la zona cilíndrica de la vasija y el anillo de transición a la cabeza inferior, y se hizo uso de técnicas de ultrasonidos automáticas, salvo para la zona de la brida, en la que fue necesario utilizar equipos manuales debido a problemas de espacio y accesibilidad.

Los resultados de las inspecciones suplementarias confirmaron las sospechas iniciales. La zona más afectada de la vasija era la zona central de las virolas del núcleo; tanto el anillo superior como el inferior. Otras partes de la vasija se encontraban casi desprovistas de estos defectos, como se puede ver en la tabla 1. Con las técnicas utilizadas se determinó que las indicaciones eran de tipo cuasilaminar con un diámetro medio entre 10 y 14 mm; alguna de ellas con valores próximos a 25 mm. La mayoría de estos defectos se agrupaban en *clusters*<sup>5</sup>, que estaban concentrados en el material base, alejados de la zona soldada, fundamentalmente entre la interfase con el *cladding* y hasta una profundidad de aproximadamente la mitad del espesor de la vasija (ver figuras 2, 3 y 4 en la página siguiente). En el cuadro de texto de la

página 16 se describen las tensiones mecánicas a las que se ven sometidas las vasijas de los reactores nucleares.

Ante la magnitud del suceso, el 31 de julio de 2012, el organismo regulador belga (Federal Agency for Nuclear Control-FANC) envió el IRS (International Incident Report System) número 824 haciendo público el problema detectado. FANC convocó una reunión entre otros reguladores para informar y discutir la situación de otras vasijas potencialmente afectadas por estos defectos, especialmente aquellas que fueron fabricadas por la empresa Rotterdam Droogdok Maatschppij (RDM), suministradora de la de la central Döel 3. El hecho de centrar la atención en el fabricante fue debido a que preliminarmente se consideró que los defectos provenían desde el origen y que no se habían generado durante la operación de la unidad. La reunión de reguladores tuvo lugar durante el mes de agosto de 2012 y contó con la participación española de la Subdirección de Ingeniería del CSN. Con los datos de los que se disponía en ese momento, que fueron aportados por Electrabel (empresa subsidiaria de GDF Suez y titular de la instalación), se barajaba la hipótesis de que las indicaciones se pudieran deber a defectos producidos por un incorrecto tratamiento del hidrógeno presente en el

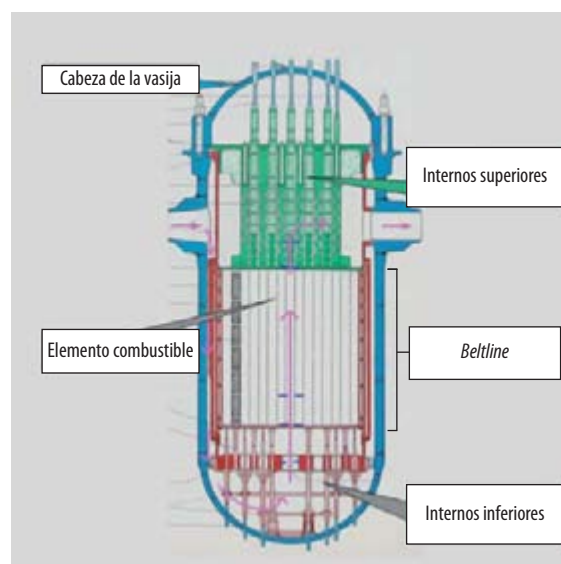


Figura 1.

acero durante el proceso de forja de los anillos en las instalaciones de la empresa RDM. Este defecto, característico de grandes piezas forjadas, se conoce como *hydrogen flaking*, debido a su parecido a un copo de nieve o a una escama.

No obstante, debido a que el proceso concreto de fabricación de grandes piezas, como las vasijas, es información propiedad de la empresa y que esta en particular cesó sus actividades nucleares en 1996 por problemas económicos, no se pudieron descartar completamente otras causas raíz. A esta contrariedad había que añadir que ciertas partes del informe de fabricación se encontraban ilegibles, por lo que no se tenía toda la información acerca de los resultados de la manufacturación de la vasija. Para verificar esta hipótesis preliminar, el titular

**Tabla 1. Número final de defectos encontrados**

| Componente de la vasija    | Döel 3       | Tihange 2  |
|----------------------------|--------------|------------|
| Brida de la tapa           | 3            | 5          |
| Brida de la vasija         | 2            | 19         |
| Anillo de penetraciones    | 11           | 0          |
| Anillo superior del núcleo | 857          | 1.931      |
| Anillo inferior del núcleo | 7.205        | 80         |
| Anillo de transición       | 71           | 0          |
|                            | <b>8.141</b> | <b>908</b> |

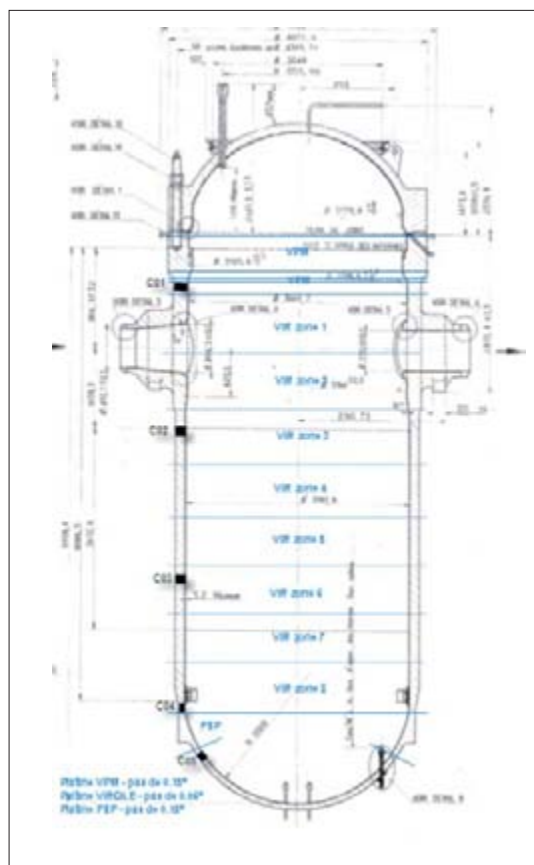


Figura 2.

de Döel propuso llevar a cabo un estudio para poder comparar la capacidad de detección de los métodos de ultrasonidos utilizados durante la fabricación actual. Para ello, se valió de unas piezas con defectos similares conocidos y que fueron rechazadas en su día por la empresa francesa Areva. Además, se trabajó en la confirmación de la integridad estructural ya que, si bien de forma individual estos defectos pueden considerarse aceptables de

acuerdo con los criterios definidos en el Código ASME, al encontrarse tantos y tan próximos, dicha integridad podría verse comprometida. Todas estas actividades iniciadas por Electrabel estaban orientadas a garantizar, en el menor plazo posible, que la operación comercial de los reactores pudiese realizarse sin una merma en su seguridad.

El organismo regulador se encontraba inmerso en la evaluación de toda la

ELECTRABEL

información que le estaba facilitando Electrabel, de los estudios adicionales que había requerido y de los resultados que pudiera aportar la inspección de otra central belga, Tihange 2, cuya vasija también fue suministrada por RDM y formó parte del mismo pedido que la de Döel. Más adelante, los resultados obtenidos en Tihange durante las inspecciones de septiembre de 2012 confirmaron la presencia de defectos de similar forma y semejante localización, pero en un número menor, como se observa en la tabla 1. Con el objetivo de asesorar a FANC y compartir conocimientos y prácticas reguladoras, se constituyeron tres grupos de trabajo, todos ellos con participación directa o indirecta del CSN. Cada grupo de expertos se centró en diferentes aspectos: ensayos no destructivos (Working Group 1 -WG1), origen metalúrgico de los defectos (Working Group 2 -WG2) y mecánica estructural y de la fractura (Working Group 3 -WG3). Aparte de estos grupos, integrados principalmente por personal de los organismos reguladores, se formaron otros para asesorar a FANC: un grupo nacional de expertos de diversas universidades belgas (Consejo Nacional de Expertos) y un grupo independiente internacional de expertos (Panel de Revisión Internacional). La integración de todos estos colectivos dentro del proceso de la autorización para la reanudación de la operación comercial de los reactores afectados, puede verse en la figura 5.

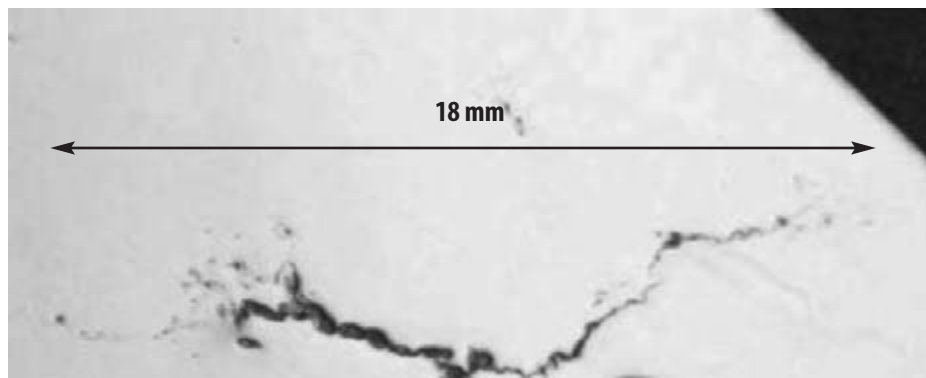


Figura 3.

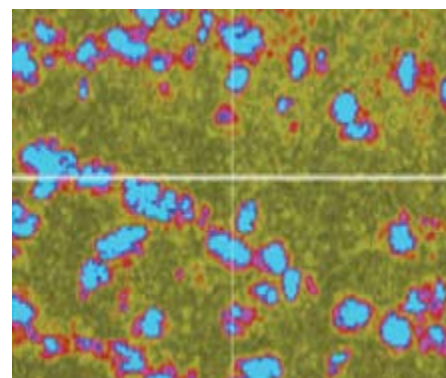


Figura 4.

## Labor desarrollada por los grupos de trabajo de reguladores

La primera reunión técnica de los grupos de trabajo tuvo lugar en las oficinas de FANC en Bruselas, el 16 de octubre de 2012. El objetivo fue compartir la experiencia previa acerca de este tipo de defectos y los distintos enfoques de cada regulador, en función de su base normativa.

El WG1 se creó para analizar la bondad de las técnicas de ultrasonidos disponibles, tanto en la fabricación de la vasija, como en las inspecciones recientes, teniendo en cuenta la naturaleza de las indicaciones observadas. En definitiva, se trataba de resolver dos cuestiones que eran importantes a la hora de autorizar la hipotética puesta en marcha de los reactores. Por un lado, era significativo determinar si, en el momento de la fabricación, las técnicas de END eran capaces de detectar este tipo de defectos y, en caso afirmativo, concluir por qué no se informó de ello. Por otro lado, se lanzó una campaña de validación para poder afirmar que los defectos detectados estaban bien caracterizados en forma, orientación y número. Para esta última labor se contaba con una probeta propiedad de Areva proveniente de una virola de un generador de vapor que había sido rechazado en la fábrica precisamente por contener *hydrogen flaking*.

El trabajo del WG2 consistió en determinar la causa raíz del origen de los defectos de las vasijas que, como se ha avanzado ya anteriormente, de manera preliminar se atribuyó a un inadecuado control del hidrógeno durante las operaciones de forja y tratamiento térmico de las piezas. Asimismo, una vez determinado este aspecto, se discutieron los posibles mecanismos de propagación de estos defectos, de forma que se pudieran dictaminar las acciones de prevención y control necesarias en el caso de que se aprobara la puesta en marcha de los reactores. Para esta tarea también fue preciso establecer un

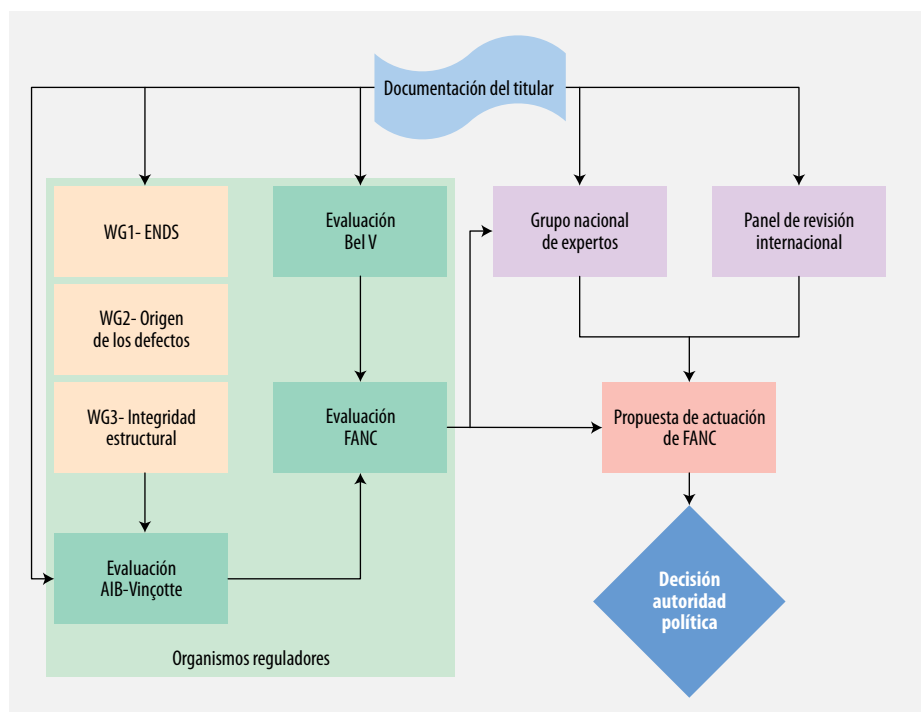


Figura 5: Proceso de autorización para el arranque de los reactores de Döel y Tihange (Elaboración propia).

programa de ensayos que permitiera caracterizar las propiedades mecánicas reales del material.

Para la representación española en el grupo encargado de investigar acerca del origen metalúrgico de los defectos (WG2), el CSN estableció un acuerdo específico dentro del convenio marco de colaboración con la División de Materiales Estructurales del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). Además de la asistencia a las reuniones, en el acuerdo se incluyó la elaboración de un informe final que recogió todas las conclusiones del grupo de trabajo y un juicio de expertos acerca de la posible extensión de causa a otros métodos de fabricación de vasijas distintos a los de Döel y Tihange, e incluso a otros componentes.

Con toda la información recopilada por los dos grupos de trabajo anteriores, el cometido del WG3 fue decidir cómo se podría demostrar la integridad estructural de las vasijas de Döel y Tihange. Dicha misión resultó una labor compleja al no existir ningún código de diseño que

contara con una metodología capaz de abordar un cálculo con miles de defectos de tipo laminar con diferente orientación, tamaño y extensión. También era necesario determinar si la aproximación de tipo probabilista sugerida por Electrabel (frente a las aproximaciones deterministas habituales en las labores de licenciamiento de los organismos reguladores) se podía considerar aceptable *per se*, o se tendría en cuenta como un análisis complementario. En cualquiera de los casos, el problema principal con el que contaba FANC era la ausencia de una metodología validada.

## Evaluación preliminar de FANC

Tras la labor que supuso evaluar toda la documentación generada por Electrabel y contabilizar todas las aportaciones que surgieron de los grupos de trabajo, FANC presentó sus resultados preliminares a los miembros que habían participado en el proceso durante una reunión que tuvo lugar los días 8 y 9 de enero del 2013. Unos días más tarde, el 15 de enero, emitió un comunicado indicando que, si

bien no veía razones para una parada definitiva de las centrales afectadas, posponía la decisión del rearranque hasta analizar la información adicional que había requerido al titular. Finalizado el análisis, se verían en condiciones de comunicar si los márgenes de seguridad se encontraban intactos o no.

A continuación se incluye una descripción de los aspectos más destacados de la evaluación de seguridad elaborada por Electrabel y el organismo regulador belga, de acuerdo con el esquema propuesto para los grupos de trabajo. En la figura 6 se puede ver la hoja de ruta propuesta por el titular de las centrales de Döel y Tihange.

Con respecto al origen de las indicaciones, se admitió la hipótesis de que la formación de *hydrogen flakes* se produjo durante la fabricación de las piezas. La formación de defectos debido al hidrógeno en grandes piezas forjadas durante el proceso de fabricación es un problema ampliamente conocido en el sector y ya detectado en los años 80. Recientemente, Areva había descubierto un gran número

de ellas en una de las virolas que conformaban un generador de vapor en construcción para una central de 1.300 MW. Estas “escamas” se forman debido a una elevada presencia de hidrógeno durante la colada del metal. En ausencia de un tratamiento térmico posterior de desgasificación, el hidrógeno, que inicialmente se encuentra en estado atómico, no es capaz de difundirse completamente, se combina en estado molecular y se queda atrapado en zonas propensas a ello como inclusiones no metálicas, carburos y bordes de grano en las que se produce un aumento de la presión interna. Esta presión, unida a tensiones locales, conduce a agrietamientos paralelos a la dirección del flujo del metal. En el expediente de fabricación de las vasijas no consta este tratamiento de deshidrogenación, aunque esto no quiere decir que no se hiciera, ya que formaba parte del *know how* de RDM y no era práctica habitual, ni era requerido plasmarlo explícitamente. A este hecho hay que sumar que se eliminó una cantidad escasa del material central del lingote inicial previo a las operaciones

de forja, que hubiera descartado la mayor parte del acero afectado por el *hydrogen flaking*. Así que, debido a que no existió un tratamiento térmico de desgasificación, o que este fue insuficiente, la aparición de defectos debidos al hidrógeno está íntimamente ligada al control de vacío durante la colada del lingote, que a tenor de los resultados no fue óptimo en el caso de algunas virolas de Döel y Tihange. Los estudios realizados, y aprobados por FANC, concluyen que el único mecanismo posible de propagación de las grietas es la fatiga de bajo número de ciclos, que se produce en transitorios de operación tales como paradas y arranques. No obstante esta propagación es menor del 2,4 % para un periodo de 40 años, es decir que el crecimiento sería de menos de 1,1 mm durante 40 años.

El trabajo realizado sobre la pieza propiedad de Areva, rechazada por contener defectos del tipo de los encontrados en Döel, permitió evaluar la capacidad de los métodos del ultrasonido utilizados para la correcta detección, posicionamiento y caracterización de las



Figura 6: Hoja de ruta propuesta por Electrabel. (Elaboración propia).

indicaciones. A tenor de los resultados, se pudo confirmar el elevado número de indicaciones en ambas vasijas. No obstante, debido a que la muestra de Areva no es del todo representativa, ya que no contiene *cladding* ni fue sometida a tratamientos térmicos, no se puede calificar el método formalmente. De esta manera existen algunas incertidumbres respecto a las indicaciones observadas. En particular, no es posible confirmar que algunas hayan sido perfectamente caracterizadas y dimensionadas, como aquellas con inclinaciones superiores a 10° o las más próximas al plaqueado. Tampoco es descartable que otros defectos se encuentren ocultos o atenuados por otros. A juicio de FANC era necesario resolver estas cuestiones a medio plazo, tras una hipotética puesta en marcha.

Para garantizar que los defectos encontrados no comprometen la integridad estructural de las vasijas, fue necesario desarrollar una metodología adecuada, así como garantizar que las propiedades mecánicas utilizadas como *input* de los cálculos eran suficientemente representativas. El titular había realizado tres tipos de aproximaciones en los análisis, con los que pretendía dar respuesta a todos los requisitos para la aceptabilidad estructural de las vasijas:

— Una reevaluación de tensiones primarias, de tipo determinista, de acuerdo con la sección III del Código ASME, considerando que existe una reducción en el espesor efectivo de la pared de las

vasijas por la presencia de los defectos.

— Un cálculo determinista basado en la sección XI de ASME, para demostrar que la dimensión de cada defecto, o combinación de ellos, está por debajo del valor admisible en todas las condiciones operativas. Para ello fue necesario desarrollar una metodología que pudiese agrupar defectos adyacentes. Las reglas de proximidad utilizadas para combinar defectos y contabilizar la interacción entre los factores de intensidad de tensiones<sup>6</sup> de aquellos que están cercanos, se definieron a partir de un modelo bidimensional de una placa con dos defectos próximos entre sí.

— Un cálculo probabilista complementario siguiendo la metodología del 10CFR50.61a, que concluyó que la frecuencia de iniciación de grieta era del orden de 10<sup>-8</sup> por reactor y año<sup>7</sup>.

Pero todos estos cálculos no tenían validez sin la certeza de que las propiedades mecánicas del material que se habían utilizado en el cálculo eran representativas, en particular la tenacidad de fractura. Para ello, se había realizado un extenso estudio sobre una serie de probetas obtenidas de distintos materiales con diferentes defectos, orientaciones y composición, como se resume en la tabla 2. Del análisis de los resultados Electrabel concluyó que no había modificación en las propiedades del acero por efecto de la orientación de los defectos ni por la existencia de segregaciones. Sí que se determinó que existía un pequeño incremento en la fragilización por efecto de

la irradiación en las zonas con macrosegregaciones producidas durante la fabricación. Para tener en cuenta este efecto se introdujo un desplazamiento adicional de 50 °C en la RT<sub>NDT</sub><sup>8</sup> considerada en el análisis estructural.

Adicionalmente y de forma voluntaria, el titular decidió tomar una medida para aumentar el margen de seguridad de la operación. Uno de los transitorios conocido como Choque Térmico a Presión (PTS, en sus siglas en inglés) se caracteriza por un enfriamiento rápido de la superficie interna de la vasija en combinación con una represurización del sistema. Para reducir estos contrastes, Electrabel decidió incluir un sistema de caldeo en el tanque de almacenamiento de agua de recarga (que es la fuente principal de refrigerante del sistema de inyección de seguridad). De esta manera se incrementa la temperatura del agua hasta los 30 °C, lo que reduce el impacto de este transitorio.

### Autorización de puesta en marcha de los reactores

El informe de FANC, presentado en enero de 2013 a los diversos representantes que habían participado de un modo u otro en la evaluación del análisis de seguridad realizado por Electrabel, había identificado una serie de aspectos abiertos en los tres grandes bloques:

- a) Técnicas de ultrasonidos,
- b) Origen y evolución de los defectos y

**Tabla 2: Materiales y programa de ensayos**

| Fuente | Componente                | Característica  | Lab       | Orient.                     | Segreg. | Irrad. |
|--------|---------------------------|-----------------|-----------|-----------------------------|---------|--------|
| Doel 3 | Cápsula de vigilancia     | Irradiado       | SCK.CEN   |                             |         | X      |
|        | Cupón de soldadura        | Sin irradiar    | SCK.CEN   | X                           |         |        |
|        | Virola de las toberas     | Segregaciones   | SCK.CEN   | X                           | X       |        |
| AREVA  |                           |                 | AREVA     |                             |         |        |
|        | Virola con segregaciones  | Segregaciones   | AREVA     | X                           | X       |        |
|        | Virola Generador de Vapor | Hydrogen flakes | AREVA     |                             |         |        |
|        |                           |                 | LABORELEC | Validación preliminar de UT |         |        |

c) Propiedades mecánicas e integridad estructural de la vasija.

En consecuencia, los reactores de Döel 3 y Tihange 2 solo podrían rearmar tras cumplir con una serie de requisitos que el organismo regulador había determinado que debían resolverse a corto y medio plazo. Estos incluían una completa validación de los métodos de ultrasonidos, completar el programa de caracterización del material, la realización de una prueba de presión en ambas vasijas y ampliar el cálculo de mecánico bajo cargas más penalizantes que las originariamente propuestas.

El titular, en respuesta a dichos requisitos, trazó un plan de acción específico

para satisfacer los objetivos reguladores y desarrolló la metodología y los criterios de aceptación adecuada a los nuevos requerimientos. Durante los primeros meses de 2013 la implementación de este plan fue seguido de cerca por FANC, por el organismo que proporciona soporte técnico, Bel V, y por la agencia de inspección AIB-Vinçotte. En el mes de abril, Electrabel presentó dos adendas a los análisis de seguridad dando respuesta a las acciones a corto plazo exigidas. Las conclusiones finales de todo este largo proceso, una vez tomada la decisión de la puesta en marcha de los reactores, se presentó a las autoridades reguladoras participantes el pasado 28 de agosto de 2013.

El método de ensayo por ultrasonidos ha demostrado ser válido para la

detección y caracterización de los defectos encontrados y la orientación recta del haz (0 °C) era la adecuada. Las simulaciones adicionales y los ensayos destructivos sobre las piezas con defectos conocidos han revelado que indicaciones con mayor inclinación o de menor tamaño serían observables con las capacidades actuales. Se ha confirmado que la tipología de las indicaciones se corresponde con grietas debidas al hidrógeno, *hydrogen flaking*, originadas durante el proceso de forja de las virolas. La causa raíz exacta de los defectos, el motivo de que no fuesen reportados durante la fabricación y la razón por la que solo se vieron afectadas una serie de virolas con la información de la que se dispone a día de hoy sigue siendo desconocida. No

## Ensayos no destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos (END) son procedimientos de inspección que permiten evaluar la calidad intrínseca de un material sin alterar de forma permanente ninguna de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Generalizando, se puede afirmar que las técnicas de END se basan en medir alguna propiedad de la pieza a inspeccionar cuyas variaciones estén relacionadas con la existencia de discontinuidades de cualquier índole. Partiendo de esta definición se pueden agrupar los END en función de la aplicación de un determinado principio físico u otro: ondas electromagnéticas, ondas acústicas, emisión de partículas, capilaridad, absorción, etc.

En comparación con los ensayos mecánicos convencionales, que suponen la destrucción parcial o total de la pieza, los END permiten la inspección del 100 % de la producción si esto fuese necesario, lo que contribuye a garantizar un nivel de calidad uniforme y asegurar la integridad funcional de estructuras, sistemas y componentes. Para realizar esta vigilancia en el ámbito nuclear se establecen una serie de programas de vigilancia específicos que se encargan de monitorizar su estado. Uno de los más importantes es el Programa de Inspección en Servicio, más conocido como ISI, que se rige por los requerimientos de la sección XI del Código ASME, de obligado cumplimiento para las

centrales nucleares españolas. Los métodos de END requeridos en esta sección, están descritos a su vez en la sección V del mismo código, donde se establece cómo se deben realizar.

Una clasificación más práctica de los END puede realizarse en función de las características del componente que se va a ensayar y de los defectos que se puedan detectar. Así, se habla de ensayos visuales, superficiales o volumétricos. Dentro de los ensayos volumétricos, denominados de esta manera por ser capaces de observar el espesor total de la zona de interés, los que detectaron las indicaciones en las vasijas de Döel y Tihange son los ultrasonidos, que consiste en la emisión de ondas sonoras sobre una pieza y el posterior registro de las reflejadas, lo que permite detectar posibles discontinuidades en el material analizado. Son muy utilizados en las inspecciones de las centrales nucleares y se pueden aplicar de forma manual (muy frecuente su utilización en tuberías de pequeño diámetro o en zonas con poco espacio disponible para trabajar) o de forma automática (como en el caso de las paredes de las vasijas de los reactores nucleares, lo que tiene la ventaja de reducir el tiempo de exposición del personal que maneje los equipos de ultrasonido a las radiaciones ionizantes). En función de una serie de parámetros, como el ángulo de incidencia del haz sobre la pieza (típicamente 0°, 45° 60° y 70°) o el tipo de onda utilizada (longitudinal o transversal), se determina la caracterización de los tipos de defecto. ▀

## Tensiones mecánicas en vasijas a presión

El Código ASME, en su sección III, establece las normas de seguridad para la construcción de componentes y estructuras en centrales nucleares. Para determinar cuándo sobreviene el fallo de un elemento sometido a un esfuerzo mecánico determinado, el código fija el cálculo de las tensiones límite en función del tipo de carga aplicada. Estos límites o factores de seguridad están basados en diversas teorías clásicas de resistencia de materiales, como la de la *tensión principal máxima* o la del *esfuerzo cortante máximo*.

En los recipientes a presión, como lo es la vasija de un reactor nuclear, las tensiones se clasifican, según su origen, en primarias (como las debidas a la presión interna), secundarias (como las que aparecen en los anclajes por los gradientes térmicos) y de pico (que aparecen donde hay cambios geométricos bruscos). Las tensiones que aparecen en la vasija de un reactor nuclear debido a la presión interna del refrigerante se clasifican como primarias.

En resistencia de materiales, cuando el espesor de la pared del recipiente es pequeño en comparación con las otras dimensiones, este se identifica como de pared delgada. En esta situación, las ecuaciones de las tensiones longitudinales ( $\sigma_1$ ) y tangenciales ( $\sigma_2$ ) para un recipiente cilíndrico son las siguientes (figura C.1):

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{2 \cdot e} \quad \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{e}$$

De esta formulación se obtienen importantes conclusiones que ayudan a entender qué defectos son más perjudiciales en las vasijas de los reactores. Como se puede observar, la tensión tangencial es el doble de la longitudinal. Las fisuras más perjudiciales, aquellas que tienen más facilidad para progresar y, eventualmente, conducir a un fallo del componente, son aquellas que se encuentran en un plano situado perpendicularmente a la dirección de la tensión más elevada ( $\sigma_2$ ) ya que este esfuerzo tiende a abrir la grieta. De este modo, las fisuras situadas perpendicularmente a la dirección tangencial son las más alarmantes en las vasijas. Los defectos situados paralelos a la superficie donde actúa la presión se conocen como laminares y son poco preocupantes para la integridad de las vasijas porque, según la teoría de paredes delgadas, las tensiones en la dirección radial son despreciables. En el caso de Döel y Tihange la orientación de las grietas encontradas era cuasilaminares, debido a que algunas de ellas se desviaban más de 10° respecto a la pared, por lo que su importancia era algo mayor.

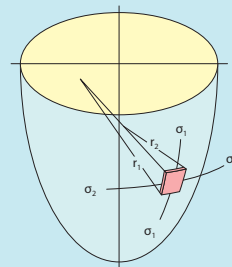


Figura C.1. Tensiones longitudinales y tangenciales en un cuerpo.

obstante, una vez estudiados todos los posibles mecanismos, la evolución con el tiempo de estos defectos es improbable. El programa de ensayos mecánicos planteado inicialmente por Electrabel debía ser complementado con una serie de actuaciones a corto y medio plazo para que el conocimiento de las características del material fuese pleno y diese validez al resultado de los cálculos. Sin ellos, la validez estructural de las vasijas podría verse comprometida. En concreto, como acción más importante, FANC solicitó que el titular cuantificará, antes de la primera parada por recarga de ambos grupos, el efecto de la irradiación en probetas con *hydrogen flaking*.

El 17 de mayo, FANC emitió una nota de prensa informando de que el titular de los reactores ha cumplido completamente con los requisitos que se le habían impuesto, por lo que consideraba que podían reiniciar su operación comercial de forma segura. La unidad 3 de la central nuclear de Döel volvió a arrancar el pasado 3 de junio, casi un año después de su accidentada parada por recarga. Tihange 2 se conectó a la red unos días más tarde, el 7 de junio.

### Acciones tomadas en el ámbito internacional y nacional

Muy poco tiempo después de que se notificaran los resultados de las inspeccio-

nes de la parada de Döel, algunos reguladores con vasijas potencialmente afectadas empezaron a tomar las primeras acciones de forma individual. Unos meses más tarde, WENRA (Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental) publicó unas recomendaciones generales para armonizar las actuaciones de sus miembros.

En septiembre de 2012 algunos países, entre ellos España, tomaron las primeras medidas de actuación, que fueron comentadas durante la reunión de lanzamiento de los grupos de trabajo internacionales en Bruselas. Las centrales de Ringhals 2 (Suecia) y Mühleberg (Suiza) han realizado inspecciones bus-

cando grietas de tipo laminar como las encontradas en Bélgica, con resultado negativo. En meses posteriores también se realizaron inspecciones adicionales, sin que se encontraran indicaciones de defectos, en centrales de Alemania (Nec-kar Westheim y Grohnde) y Holanda (Borssele). En Estados Unidos, la NRC ha publicado recientemente la IN 2013-19 describiendo todo lo sucedido en Döel/Tihange y la industria (EPRI) está considerando una serie de acciones al respecto, tras una puesta en común durante un *public meeting* celebrado el pasado 5 de diciembre.

WENRA ha centrado su recomendación en aquellas centrales con vasijas fabricadas mediante forja, diferenciando dos estadios. Un primer paso (*Step 1*) consta de la revisión del proceso de fabricación y control de calidad de las forjas, y evalúa la documentación disponible sobre control del hidrógeno. En función de los resultados obtenidos, y siempre a criterio del organismo regulador, propone dar un segundo paso (*Step 2*) y realizar una serie de inspecciones encaminadas a detectar posibles defectos debidos al *hydrogen flaking*. El alcance y volumen de la inspección, así como la elección de la técnica adoptada, recae en la autoridad nuclear nacional.

El CSN evaluó la posible afectación de las vasijas españolas antes de la creación de los grupos de trabajo y tomó las primeras medidas en septiembre de 2012. De forma preliminar, coincidiendo con

las acciones que meses más tarde se propusieron desde WENRA, se valoró que las centrales potencialmente afectadas eran aquellas cuya vasija había sido fabricada mediante el proceso de forja. El resto de las plantas fueron preliminarmente descartadas; acción que posteriormente fue respaldada tanto por las conclusiones de los grupos de expertos como por las recomendaciones de WENRA. De los resultados obtenidos en las inspecciones realizadas por el CSN y de la evaluación de los últimos registros de inspección llevados a cabo por los titulares de las centrales, se concluyeron tres aspectos importantes:

— Ciertas diferencias en el proceso de fabricación y en el material de las virolas de las vasijas españolas respecto de las vasijas belgas, como un mayor diámetro practicado sobre el lingote inicial, reducen la probabilidad de aparición de defectos por hidrógeno.

— Está garantizado de que los métodos de inspección en servicio de la vasija habrían sido capaces de detectar estos defectos en caso de que existieran.

— Los tratamientos térmicos practicados durante la fabricación, minimizan la aparición de defectos de tipo laminar debido al hidrógeno.

Estos aspectos han llevado al CSN a no requerir ninguna actuación adicional a los titulares de las centrales nucleares españolas en operación.

### Parada anticipada de los reactores

El día 25 de marzo de 2013 Electrabel

comunicaba a FANC su decisión de adelantar la fecha de la parada por recarga de los reactores nucleares de Doel 3 y Tihange 2. La razón es que los ensayos mecánicos realizados sobre piezas con hydrogen flakes que han sido irradiadas, para dar cumplimiento al requisito del regulador, han dado resultados inesperados. Estos resultados preliminares indican que el incremento en la  $RT_{NDT}$  es mayor que el predicho por los modelos teóricos sobre los que se sustentaron los cálculos. El impacto de la irradiación, según indica el titular de los reactores afectados, parece ser mayor que los asumidos en el *safety case*.

La irradiación de las probetas se ha llevado a cabo en el reactor BR2 del centro de investigación belga SCK.CEN. Este reactor experimental permite irradiar con flujos neutrónicos elevados que simulan, en un solo mes, 40 años de operación de un reactor de agua a presión.

Electrabel está explorando posibles explicaciones para estos inesperados resultados. Se están considerando si, tanto la representatividad de las probetas que se han envejecido como las condiciones en las que se han llevado a cabo los ensayos, se corresponden con la realidad de las vasijas de Doel 3 y Tihange 2.

Según ha informado FANC, se tomará el tiempo necesario para evaluar la nueva situación de las plantas antes de tomar ninguna decisión sobre la puesta en marcha de nuevo de los reactores o su cierre definitivo.

<sup>1</sup> *Cladding*: recubrimiento interior de acero inoxidable de algunos elementos que sirve como protección frente a fenómenos de degradación. También se conoce como plaqueado, aunque es menos utilizado.

<sup>2</sup> *Beltline*: parte de la zona cilíndrica de la vasija que rodea al núcleo.

<sup>3</sup> ASME: Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, en sus siglas en inglés.

<sup>4</sup> En técnicas de END se denomina indicación a una señal obtenida debido a una discontinuidad en el material

<sup>5</sup> *Cluster*: Conjunto de defectos agrupados en forma de racimo.

<sup>6</sup> En mecánica de la fractura, factor que contabiliza los esfuerzos a los que se ve sometida la grieta.

<sup>7</sup> El criterio de aceptación de dicha regulación de origen norteamericano es de  $10^{-6}$ .

<sup>8</sup> Temperatura de transición de dúctil a frágil.



Todo el equipo de la Dirección Técnica de Protección Radiológica ante la sede del CSN.

“El CSN por dentro”, nueva sección de *Alfa*

## La protección radiológica, la otra cara del CSN

La aplicación del marco regulador en el ámbito de la protección radiológica de la gestión de residuos, la vigilancia radiológica ambiental, el impacto radiológico, el desmantelamiento de centrales nucleares, la supervisión de antiguos emplazamientos mineros,

de 1.700 instalaciones radiactivas y de más de 34.000 instalaciones de radiodiagnóstico, la gestión de emergencias y de la seguridad física y la dosimetría, están entre sus competencias. ■ Texto: **Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN ■

“**E**l CSN por dentro” es una nueva sección de la revista *Alfa* en la que analizaremos el trabajo que se realiza en las diferentes áreas que componen el Consejo de Seguridad Nuclear, aunque nuestro principal propósito es presentar al lector el equipo humano que forma parte del organismo regulador, así como sus principales funciones.

El CSN como único organismo competente en materia de seguridad nuclear

y protección radiológica, es un regulador tecnológico, que como tal tiene atribuciones en los ámbitos de normativa, licenciamiento, supervisión y control, así como la capacidad de proponer sanciones.

Desde que se creó en 1980, la seguridad nuclear y la protección radiológica han sido el objetivo fundamental de este organismo. Para cumplir con ambas misiones, inicialmente, se creó la Dirección Técnica que, posteriormente, en el

año 2000, se dividió en las dos direcciones técnicas sobre las que actualmente se sostiene el Consejo: la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear y la Dirección Técnica de Protección Radiológica.

Aunque quizá lo más conocido de la labor del CSN sea la supervisión y el control de las centrales nucleares, la otra cara del organismo regulador, y a la que también dedica numerosos efectivos, es la protección radiológica.

Por ello, vamos a inaugurar esta nueva sección con la Dirección Técnica de Protección Radiológica.

Las funciones que realiza la Dirección de Protección Radiológica son muchas y multidisciplinarias, por lo que están distribuidas en varias subdirecciones que se adaptan a cada uno de los cometidos: la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental, encabezada por Lucila M<sup>a</sup> Ramos; la de Protección Radiológica Operacional, por Javier Zarzuela; y la de Emergencias y Protección Física, por Miguel Calvín, todos ellos técnicos en seguridad nuclear y protección radiológica con una larga y exitosa carrera profesional a sus espaldas en distintos cometidos en el organismo.

A modo de definición, la protección radiológica es el conjunto de medidas establecidas para garantizar la protección de los individuos y del medio ambiente, frente a los posibles efectos nocivos que se deriven de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta actividad se divide a su vez en protección radiológica ante situaciones normales y protección radiológica ante situaciones de emergencia, un capítulo el de emergencias, siempre básico en la mayor parte de las actividades del CSN.

### Numerosas competencias

La Dirección Técnica de Protección Radiológica aborda todo lo relacionado con la protección radiológica de las personas, el control y vigilancia de la calidad radiológica del medio ambiente y el control de las fuentes de radiación. Además, se encarga de las autorizaciones a las empresas que prestan servicios técnicos de protección radiológica, así como de las 1.700 instalaciones radiactivas y de las más de 34.000 dedicadas al radiodiagnóstico.

Entre sus tareas también está la aplicación de la regulación a la gestión de los residuos radiactivos de media y baja actividad como los que se almacenan en el



## Entrevista a María Fernanda Sánchez Ojanguren

### “Asumí el cargo desde un despacho de puertas abiertas”

**PREGUNTA: ¿Cómo ha sido el primer año desde su nombramiento como directora técnica de Protección Radiológica?**

**RESPUESTA:** Han sido unos meses intensos, sin duda, pero a la vez muy gratificantes, afrontando el trabajo con gran ilusión. Desde que asumí el cargo, lo he hecho con un fuerte compromiso de esfuerzo personal y siempre desde un despacho de puertas abiertas.

Ha sido un año de organización y coordinación en el que nos hemos puesto en marcha con la intención de seguir cumpliendo con nuestra misión dentro del Consejo de Seguridad Nuclear, que no es otra que conseguir los más altos niveles de protección radiológica de los trabajadores, la población y el medio ambiente.

**P: ¿Cuáles son los retos a los que se enfrenta la Dirección Técnica este año?**

**R:** Mantener la calidad del control y vigilancia del medio ambiente, de la gestión de residuos radiactivos y de la dosimétrica de los trabajadores, está entre nuestros objetivos y hay que hacerlo conservando los máximos estándares de calidad, sin olvidar los nuevos retos que se presentan, como mejorar la eficacia y la transparencia de todas nuestras acciones. Otra de nuestras actividades prioritarias es reforzar y poner en marcha las actividades derivadas de la normativa reciente, como por ejemplo en el ámbito de las emergencias, de la radiación natural, de la contaminación de suelos, del desmantelamiento de las instalaciones y de seguridad física. *[continúa en página 20]*

[viene de página 19] Asimismo, en materia de autorizaciones, también estamos interviniendo en el licenciamiento del Almacén Temporal Centralizado (ATC) junto con la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear, así como en el desmantelamiento de la planta de tratamiento de uranio Quercus, entre otras actuaciones. Dentro de las tareas de supervisión y control estamos siguiendo el cumplimiento de las acciones derivadas del accidente de Fukushima y también las condiciones impuestas a las instalaciones nucleares y radiactivas con las autorizaciones vigentes.

**P: En el ámbito internacional ¿cuál es su principal objetivo?**

**R:** Uno de los retos más destacables que debe afrontar la Dirección Técnica de Protección Radiológica en los próximos cuatro años es la transposición a la reglamentación nacional de la nueva Directiva europea 2013/59/Euratom del Consejo. En esta directiva se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los riesgos que se derivan de la exposición a las radiaciones ionizantes y deroga cuatro directivas anteriores. Por ello, será, sin duda, una de nuestras tareas más importantes, ya que se trata de una norma de la máxima importancia en el ámbito de la protección radiológica.

**P: ¿Está satisfecha con su equipo?**

**R:** Sí. Es un verdadero lujo contar con ellos, ya que las personas que integran esta Dirección Técnica son profesionales de la máxima cualificación y experiencia. Todo ello sin olvidar que el equipo de protección radiológica es una pieza más que se integra dentro del CSN, un organismo multidisciplinar con una gran responsabilidad ante la sociedad.

**P: ¿Qué es lo que más destacaría de ellos?**

**R:** Es realmente difícil destacar un único aspecto, pero diría que su profesionalidad; es decir, la unión del conocimiento, la experiencia, la disponibilidad y, algo que es muy importante, la flexibilidad. También es básica la coordinación que mantenemos entre las distintas áreas que componen esta dirección.

*Nuestra misión es conseguir los máximos niveles de protección radiológica*

centro de El Cabril, en Córdoba, y al desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares y radiactivas como la de José Cabrera y Vandellós I.

Por último, también se encarga de todo lo relacionado con las emergencias y los planes de protección física, labores que desempeña en estrecha colaboración con otras instituciones y autoridades competentes.

Todas estas funciones se realizan teniendo en cuenta la importante misión que tienen: proteger a los trabajadores controlando que la dosis de radiación que reciben sea tan baja como razonablemente sea posible y que no supere los límites legalmente establecidos.

Al frente de todas estas tareas y desde el pasado mes de abril de 2013, se encuentra María Fernanda Sánchez Ojan-

guren acompañada por un equipo de trabajo de 135 personas. Este cargo de director técnico de Protección Radiológica, desde que existe como tal, fue ocupado anteriormente por José Ignacio Lequerica y Juan Carlos Lentijo.

María Fernanda es doctora en Química Industrial por la Universidad Complutense de Madrid y comenzó su carrera profesional en la antigua Junta de Energía Nuclear, hoy Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). Pertenece a la Escala Superior del Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear y lleva trabajando en este organismo desde 1983.

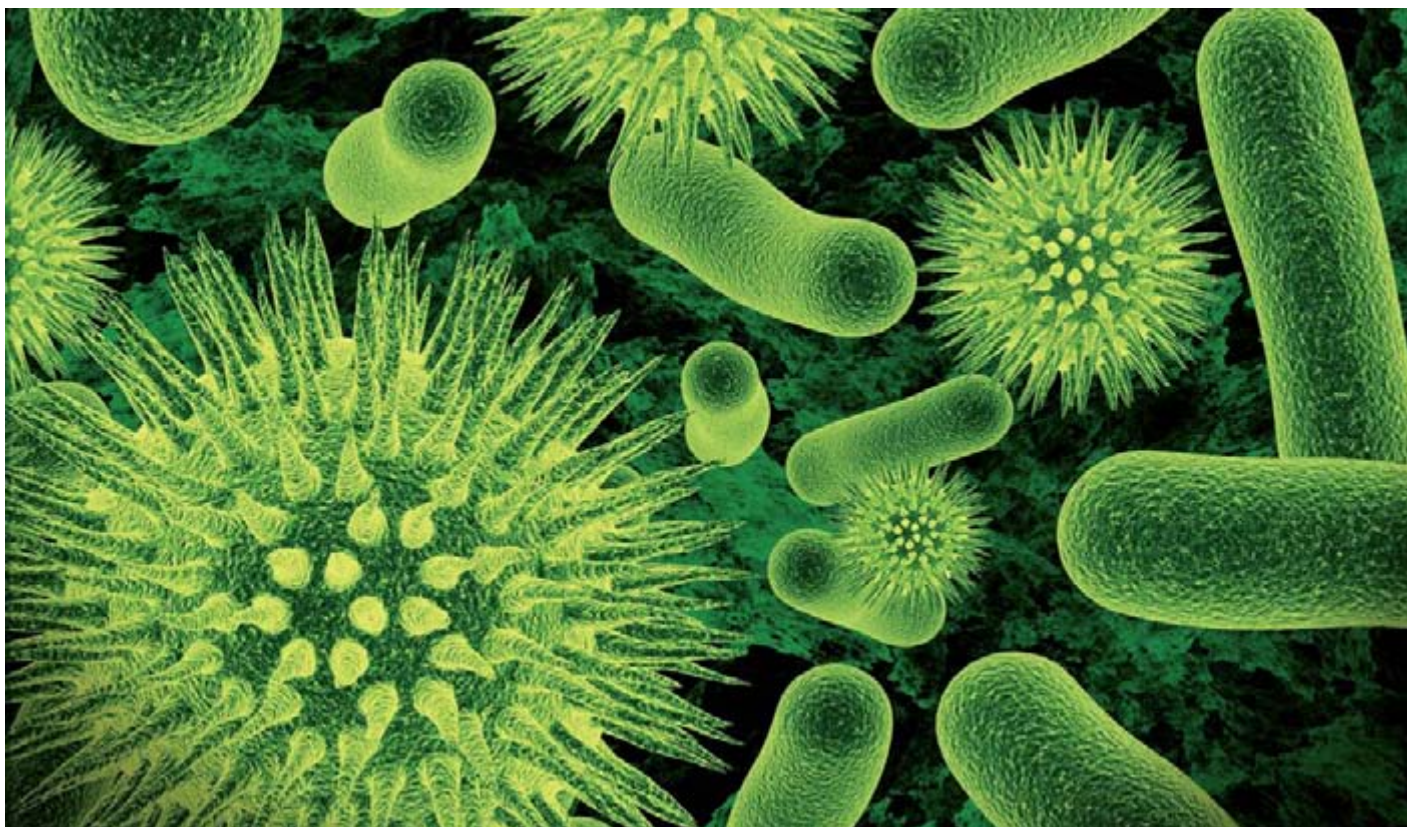
Desde que entró en el CSN ha realizado numerosas labores técnicas relacionadas con la seguridad nuclear y la protección radiológica y también ha sido asesora de diversos consejeros del organismo regulador y de la secretaria general. Es la primera mujer en ocupar el cargo de directora técnica en el área especializada en protección radiológica.

### Una vocación de servicio público

El día que tomó posesión como directora técnica de Protección Radiológica, aseguró que afrontaba el nuevo periodo con absoluta lealtad y como un servicio público, además de con una reflexión sobre la protección radiológica, que para ella es sencillamente “una filosofía de vida que implica proteger a la sociedad”.

Ahora, después de casi un año dirigiendo esta departamento del CSN, reitera que la “eficacia de su trabajo reside en la confianza de un presidente y un Pleno muy implicados en nuestra actividad”.

En los próximos números de la revista *Alfa* iremos descubriendo a estos y a otros muchos profesionales del CSN que, con su esfuerzo, cumplen un cometido básico para garantizar la seguridad nuclear y radiológica en España. ©



La capacidad evolutiva de los virus hace que surjan continuamente nuevas enfermedades infecciosas

## Los muertos vivientes

La historia de la humanidad está enlazada a la historia de unas entidades a medio camino entre la vida y la muerte, que pueblan cada rincón de la Tierra. En el siglo XIV la peste mató a uno de cada cuatro europeos; en 1918 la gripe dejó entre 20 y 40 millones de muertos por el camino; desde que enseñó los dientes en la década de los 80, el sida lleva a sus espaldas la vida de 36 millones de personas. Pero aunque en la actualidad las enfermedades infecciosas continúen siendo la

principal causa de muerte, el mundo nunca ha estado tan preparado para combatir a sus causantes. La medicina ha diseñado mecanismos de detección más eficaces, fármacos antivirales más efectivos y tratamientos más ingeniosos que abren nuevos frentes, por ejemplo, con el uso de radiaciones. Y por supuesto, las vacunas, que continúan siendo las armas más eficaces con las que el ser humano cuenta para ganar esta larga partida. ■ Texto: **Eugenia Angulo** | periodista científica ■

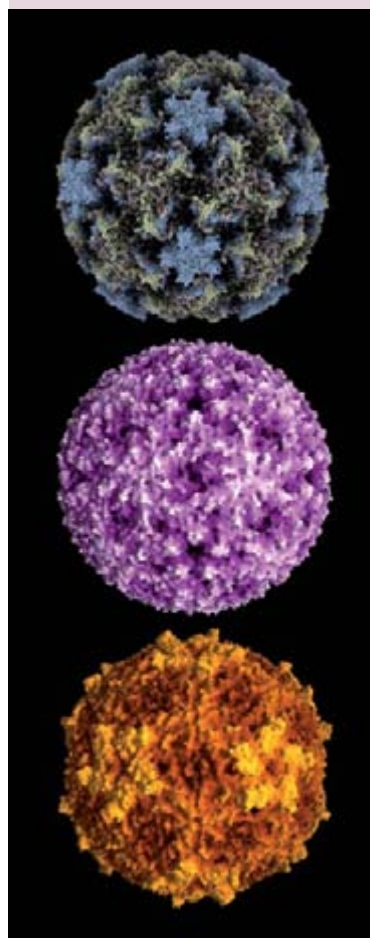
Vestidos con el *ihram*, un atuendo de dos piezas de tela blanca sin costuras, los creyentes repiten desde el amanecer hasta la puesta del sol la oración *Labbaik Allahuma Labbaik* (Aquí estoy, Oh, Señor) sobre la cima del monte Ara-

fat. Es el día grande de la peregrinación anual a la ciudad santa de La Meca, en Arabia Saudí, que se celebra con la subida al también llamado monte del Arrepentimiento, donde hace 14 siglos el profeta Mahoma pronunció su último sermón.

Los peregrinos expían sus pecados en este ritual que simboliza el juicio final y que todo musulmán debe realizar, al menos, una vez en su vida. Sin embargo, la última peregrinación ha reunido solo a 1,6 millones de fieles frente a los cerca de tres

## Los virus a la luz de los rayos X

En 1985 la revista *Nature* publicó la primera foto a nivel atómico de un virus. El fotografiado era uno de los casi 100 virus causantes del resfriado común, el rinovirus HRV-14. El autor de la fotografía, el físico y biólogo Michael Rossmann,



fue quien por primera vez aplicó la técnica de difracción de rayos X para determinar la estructura de un organismo de tipo vírico. Desde entonces, Rossmann dirige el laboratorio de cristalografía de la Universidad de Purdue, en Estados Unidos, y otro Rossmann, esta vez el superordenador o *cluster* Rossmann—que debe su nombre al anterior—trabaja resolviendo las complejísticas y evolucionadas estructuras de estas entidades.

En la actualidad, los científicos trabajan en aceleradores de partículas que usan como fuentes de luz sincrotrón. Para

Imágenes de diferentes virus obtenidas mediante rayos X.

utilizar esta tecnología necesitan obtener primero cristales de virus, cada uno de los cuales contiene miles de millones del mismo tipo de virus, que se ordenan, de forma perfecta, como los minerales que se forman en las rocas. Se les hace incidir un haz de luz muy potente que choca contra cada átomo de la estructura del virus dejando una marca, una especie de mapa de puntos, que necesita de un brutal tratamiento matemático posterior que solo pueden hacer supercomputadores como Rossmann.

Otras técnicas utilizan radiación para ver más allá; por ejemplo, lo que ocurre cuando un virus ya ha infectado a una célula. Es el caso de la microscopía de rayos X, y, recientemente, un equipo del Centro Nacional de Biotecnología la utilizó para obtener imágenes de células infectadas desde distintos ángulos. La información obtenida se procesó mediante una reconstrucción tomográfica tridimensional y el resultado final consistió en una serie de imágenes que han permitido a los investigadores detectar las zonas donde se ensamblan los virus y las distintas fases del proceso de maduración del virus dentro de una célula.

Las radiaciones también están presentes en el mundo de los virus por el lado del tratamiento. Investigadores de la Universidad Yeshiva de Nueva York presentaron en la última Asamblea de la Sociedad Norteamericana de Radiología, celebrada recientemente en Chicago, un tratamiento de radioterapia para combatir el VIH, de manera que se eliminen las células infectadas sin dañar las no infectadas. La idea es encontrar receptores celulares específicos que lleven la radiación hasta las células infectadas. De momento ya lo han conseguido con cultivos celulares en laboratorio aunque solo es un primer paso que deberá confirmarse más adelante.

millones de años anteriores, casi un 50 % menos. La causa: el miedo.

En septiembre de 2012 se detectó una enfermedad infecciosa grave causada por un virus hasta entonces desconocido: el coronavirus MERS, que debe su nombre a la enfermedad que produce, el síndrome respiratorio de Oriente Medio (*Middle East Respiratory Syndrome*, en inglés) que causa fiebres altísimas, tos y dificultad para respirar. Su tasa de mortalidad ronda el 50 % y desde su descubrimiento, ha infectado a 136 personas, la mayoría de ellos en la península

arábiga. Según la última notificación de la Organización Mundial de la Salud, 58 de ellas han fallecido.

En octubre, a solo unos pocos días de que comenzara la peregrinación, el gobierno saudí anunció seis nuevos casos de enfermos por MERS y, finalmente, decidió negar la entrada a la ciudad santa a todos aquellos que no contaran con una autorización oficial y recomendó a los mayores de 65 años, niños, mujeres embarazadas y personas con enfermedades crónicas que pospusieran su viaje a La Meca al próximo año.

Y es que salvo su pequeño tamaño, todo lo demás relacionado con los virus es grande: sus consecuencias —la restricción para peregrinar a La Meca es poco comparado con las escenas de pánico global que se vivieron tras el brote de gripe A en 2009—; su abundancia —puestos en fila india ocuparían la distancia de la Tierra al Sol  $10^{13}$  veces, es decir, ¡quintillones!—; sus huéspedes —hay virus para todas las especies animales, para hongos, algas, moluscos, incluso existen virus que infectan a otros virus—; sus víctimas —la pandemia de gripe de 1918 causó

entre 20 y 40 millones de muertos, la Primera Guerra Mundial, 16—; y hasta su papel en la evolución de los humanos —el 8 % de nuestro material genético procede de virus endógenos—. Y un último dato abrumador: al meter un pie en el mar nos adentramos en un mundo poblado mayoritariamente por estos habitantes. Según un reciente estudio publicado en *Nature*, un mililitro de agua de mar, o sea, el líquido que cabe en una cucharita de café, contiene un millón de partículas víricas lo que les convierte en los organismos más abundantes de los océanos.

Hace unos años existió un cierto optimismo acerca de la erradicación de las enfermedades infecciosas gracias a los nuevos fármacos y vacunas. La realidad no ha entendido de optimismos. Casi un siglo después de que Alexander Fleming descubriera la acción antibiótica de la penicilina y más de dos desde que la primera vacuna luchara hasta erradicar el virus de la viruela de la faz de la Tierra, las enfermedades infecciosas siguen siendo la principal causa de muerte en el mundo.

Ejemplo de ello es una investigación publicada en *Nature* por científicos de la Universidad de Columbia y del Consorcio de la Medicina de Conservación de Estados Unidos según la cual entre los años 1940 y 2004 habrían surgido más de 300 enfermedades infecciosas nuevas. Estas incluyen las primeras apariciones de enfermedades virales hasta entonces desconocidas con potencial para causar pandemias globales, como las originadas por los virus SARS o MERS; y también la vuelta de infecciones bacterianas viejas con formas nuevas, como la tuberculosis o los famosos *Staphylococcus*, que aunque menos dramáticas, también son capaces de causar enfermedad y muerte a gran escala. Los autores alertan de que los recursos mundiales invertidos en contrarrestarlas están mal distribuidos:



Control para detectar animales infectados con gripe aviar.



La rápida evolución del virus de la gripe obliga a modificar la vacuna cada año.

mientras que la mayoría de los brotes estalla en países tropicales, los científicos y los esfuerzos de vigilancia se concentran en países de occidente. Desde entonces, otras viejas enfermedades víricas también han vuelto, como la polio en Siria o las fiebres hemorrágicas causadas por hantavirus en Estados Unidos.

De estas enfermedades emergentes y reemergentes, las más espeluznantes, como las causadas por el virus del Ébola en África o el virus Nipah en Asia, afectan a relativamente pocas personas.

La más devastadora, el sida, es causada por un obstinado y paciente virus, el VIH, que se lanza a una guerra a cámara lenta contra el cuerpo humano y que, desde su descubrimiento en 1981, ha tenido consecuencias mortales para unos 35 millones de habitantes en todo el mundo. Los más explosivos, como el SARS en el año 2002, el MERS en 2012, o algunas cepas recientes de gripe aviar, podrían haberse cobrado muchas víctimas, pero gracias a la acción rápida de las autoridades, y en ocasiones también a la suerte, se ha conseguido contener los estallidos.

Afortunadamente, no todo son malas noticias. A pesar de su abundancia, solo unos pocos virus suponen una verdadera amenaza y los tratamientos con antivirales como el famoso Tamiflú y las nuevas vacunas, que ahora se diseñan cambiando gen a gen con ingeniería genética, han avanzado mucho. Además, la ciencia ha encontrado en algunos de ellos a unos inesperados aliados. La nanomedicina los utiliza como vehículos

para llevar medicamentos solo a las células que lo necesiten, mientras la ciencia de materiales se inspira en las propiedades mecánicas de la cubierta proteica que les recubre y da forma, la cápsida, cuya dureza ha resultado ser semejante a la del aluminio, para diseñar materiales más resistentes.

### Extraños pequeños seres

A medio camino entre el mundo de la materia inerte y la orgánica, siempre que se habla de estos extraños seres se acaba

## La enfermedad del silencio

“Es terrible que a estas alturas, tantos años después, aún no hayamos conseguido una vacuna. Pero hemos aprendido una enormidad sobre la biología del virus y también sobre el desarrollo de fármacos específicos, lo que ha sido un avance importantísimo que jamás había ocurrido antes en la historia”, dice Mariano Esteban, investigador en el Centro Nacional de Biotecnología y uno de los pioneros en el estudio del VIH en España.

Según datos de ONUSIDA, desde 1981, en que se identificaron los primeros casos de sida en Estados Unidos, unos 36 millones de personas han perdido la vida en todo mundo por causas vinculadas a la enfermedad. Y es que el VIH mata en silencio: como al principio no da síntomas clínicos, las personas infectadas pueden pasar años contagiando a otras sin saberlo. Son virus más peligrosos que los que producen enfermedades graves en pocos días porque se controlan peor.

En la actualidad, se lucha en dos frentes. El primero busca el escondite tras el que esperan, pacientes, los remanentes del virus, porque este no desaparece del todo con los cócteles de antirretrovirales sino que se esconde, listo para

hablando de enfermedad, pero también de vida. ¿Están vivos los virus? ¿Una envoltura proteica que protege un poco de material genético disperso puede ser considerado vida? Pues ni sí ni no, dice la ciencia.

Los virus pasan la mayor parte de su tiempo en estado de latencia, una especie de *stand-by*, hasta que encuentran a un organismo huésped compatible y ¡zas!, le infectan. Como no tienen células ni metabolismo propio, se dice que están al límite de la vida, necesitando de otra célula a la que roban su maquinaria metabólica para ponerla al servicio de su propia replicación. Es decir, tienen la capacidad de vida, pero están muertos. O como dice Luis Enjuanes, director del Laboratorio de Coronavirus del Centro Nacional de Biotecnología y uno de los mayores expertos en virus de España, “son muertos que viven”.

Este robo es posible porque el material genético de los virus, ADN o ARN, es de la misma naturaleza que el de la

Mariano Esteban, uno de los pioneros en el estudio del VIH en España.

célula infectada, de manera que esta entiende el código como propio y lo ejecuta sin darse cuenta de que en realidad está sintetizando “hijos virus”. Es una verdadera conquista tipo caballo de Troya, pero no tiene necesariamente que conducir a la enfermedad, de hecho, normalmente no lo hace.

Al adentrarse en el mundo de estas, digamos entidades, lo que más llama la atención es una habilidad asombrosa: su tremenda capacidad de mutar, recombinarse y evolucionar, generando formas cada vez más adaptadas a un medio cambiante. Son máquinas hasta cierto punto simples, pero asombrosamente dispuestas a cambiar para adaptarse. Y esa es la clave de su supervivencia.

“La causa de esta variabilidad está en su genoma. Cuando se trata de virus con

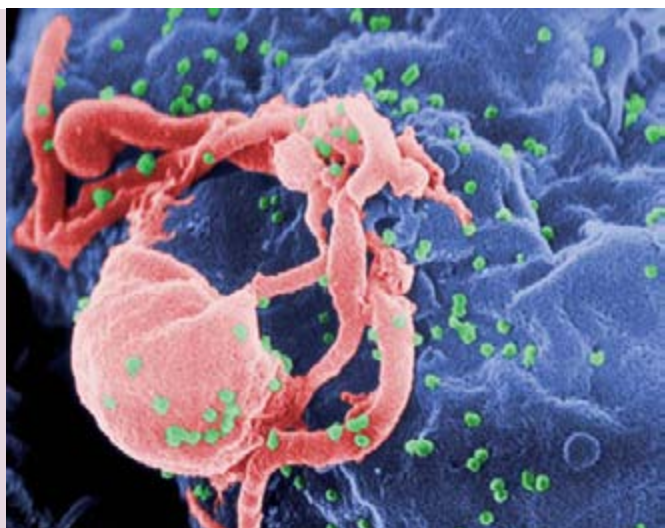
reactivarse tras sus mil caras si los pacientes abandonan la medicación. ¿Cómo y dónde sobrevive? “El VIH tiene la facultad de infectar las células clave en defensa, con lo cual disminuye la capacidad del organismo para cortar la infección. Pero además se va adaptando, mediante mutaciones en sus proteínas, y acaba escapándose”, explica Esteban. Una de las investigaciones más prometedoras, con participación española, sugiere que el virus podría esconderse tras un cierto tipo de células madre que son más longevas.

El otro frente está armado por legiones de virólogos que siguen estrujándose la mente para que pronto puedan anunciar, por fin, el descubrimiento de la vacuna más deseada. Esteban y su equipo del CSIC han desarrollado un prototipo que



genoma ADN, la variabilidad es mucho más pequeña porque existe un sistema de corrección de errores. Sin embargo, en virus ARN no existe, en general, este tipo de corrección lo que hace que casi todos los virus que salen de una célula sean distintos. De otra forma: si infectas una célula con un solo virus ARN, te va a dar entre 10.000 y 100.000 virus progenie distintos porque tiene al menos un cambio en el genoma por la acumulación de errores. Así, constantemente se están generando virus nuevos”, explica Enjuanes.

Una de las consecuencias más peligrosas de este perpetuo cambio es que a veces se adaptan a medios tan tan nuevos, que adquieren la capacidad de infectar a especies sobre las que antes no tenían ningún efecto. “Es como si tuvieras



Microfotografía del virus del sida (en verde) sobre un cultivo de linfocitos.

logra una respuesta inmune del 90 % y que se ha probado en un ensayo clínico de fase 1 en 30 voluntarios sanos del Hospital Clínic de Barcelona y del Gregorio Marañón de Madrid. Ahora trabajan en otro ensayo clínico, también en fase 1, esta vez con personas infectadas, para comprobar su eficacia como vacuna terapéutica.

una colección de llaves compuesta por miles de millones de ellas: probándolas todas al final podrías abrir ciertas cerraduras. Lo mismo pasa con los virus. Normalmente, no saltan de una especie a otra, pero dado que varían tanto y se generan tantas variantes, al final hay una que encaja con otra especie y es capaz de infectarla“, cuenta el investigador.

El sida, ébola, SARS, MERS, las gripes aviarias y otras muchas enfermedades nuevas provienen de virus que en un principio afectaban a animales pero no al ser humano, hasta que, con el puente de la variabilidad genética, han conseguido llegar a él. Encontraron la llave de nuestra cerradura, lo que en virología se llama zoonosis: transmisión de enfermedades de otros animales al ser humano. Este puede ser el murciélago, como en el caso del virus del SARS; un roedor, en el de los hantavirus; o un chimpancé, como ocurre con el VIH. El reservorio huésped del virus Ébola sigue sien-

do un misterio, aunque parece que todos los ojos se dirigen a los murciélagos. Y las gripes aviarias parten de virus comunes en aves silvestres.

Una vez el virus ha infectado al ser humano, la clave de que evolucione hacia la gravedad de una pandemia es que se dé la transmisión entre humanos. “Por ejemplo, un virus del murciélago no era capaz de entrar en células de humano, pero tras una cierta mutación lo consigue, como es el caso del SARS. Si se queda ahí, la historia puede terminar con una muerte, pero no hay evolución. La epidemia necesita que el virus se transmita de un humano a otro humano. Esto generalmente no ocurre, requiere de mutaciones adicionales. Por ejemplo, si un virus causa enfermedades

Otras investigaciones plantean ensayos clínicos más ambiciosos, con mayor número de personas, en fase 2 y 3. En Tailandia se llevó a cabo uno en fase 3, con 16.000 individuos, que dio una eficacia pobre, del 31 %, y para los próximos meses tendrá lugar otro en fase 2 en Sudáfrica, parecido al de Tailandia, que no dará resultados hasta 2016.

Estos ataques a la enfermedad apuntan hacia algo que hasta hace poco se creía impensable: que el organismo no solo controle la enfermedad, sino que consiga hacer que el virus desaparezca o quede en niveles tan bajos que el propio sistema inmune pueda controlarlo. De momento se ha conseguido que el sida pase a ser una enfermedad más de las muchas que necesitan medicación de por vida; el número de muertes ha sufrido una caída del 30 %, comparado con los niveles máximos que se alcanzaron en el año 2005, y las nuevas infecciones han descendido en un 33 % desde 2001.

A día de hoy, viven en el mundo 35 millones de personas con VIH, pero solo el 34 % de ellas accede a un tratamiento antirretroviral adecuado, según las últimas directrices de la OMS. Que por fin lo hagan es otra de las importantes luchas para que el sida deje definitivamente de estar en el silencio. ▀

respiratorias, el que infecte en la parte profunda del pulmón o la superior —que al toser va a contaminar a otras personas— depende del reconocimiento de unos receptores y eso se puede cambiar por la introducción de unas pocas mutaciones“, aclara Enjuanes. Ocurre raramente. Pero a veces ocurre.



Luis Enjuanes, director del Laboratorio de Coronavirus del Centro Nacional de Biotecnología.

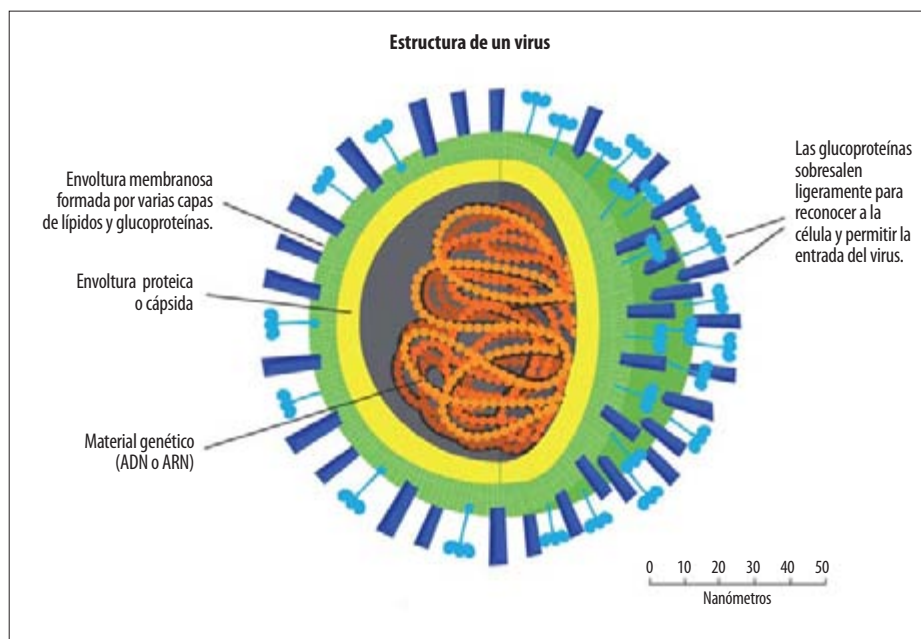
En junio de 2009 la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró la primera pandemia del siglo XXI. “El virus se transmite fácilmente entre personas y entre paí-

ses”, dijo su directora Margaret Chan tras elevar al máximo el nivel de alerta sanitaria. Se refería a la famosa gripe A H1N1, que pocos días antes había dado por primera vez la cara en un fulminante brote en México.

“Pandemia quiere decir una enfermedad que se propaga rápidamente”, recordó Chan entonces. Hace medio siglo, cruzar el planeta suponía entre seis a nueve meses porque la mayoría del transporte se hacía en barco o en tren; ahora, con el auge de la navegación aérea, bastan 24 horas para que un virus escondido en el organismo de un pasajero que lee el New York Times sentado en la fila 23, mientras piensa que el desayuno le ha sentado mal, dé la vuelta al mundo.

El origen de la infección estaba en un inusual cóctel genético que ocurrió en los cerdos. Estos tienen en sus células varios receptores que hacen posible que se adhirieran distintos tipos de virus, una especie de caldo de cultivo perfecto para que se produzcan mutaciones. En este caso, un virus de gripe aviar se combinó con una cepa humana y con el propio virus de la gripe porcina para crear el nuevo y recombinado virus H1N1, cuya mortalidad en cerdos es muy baja. Sin embargo, con nuevas mutaciones y al salir expulsado por la tos y los estornudos de estos animales, llegó a los humanos. Y con nuevas mutaciones, comenzó el contagio entre personas.

Entre abril de 2009 y agosto de 2010, fecha en la que el brote se dio por terminado, la pandemia de gripe A H1N1 dejó a su paso cerca de 20.000 muertes en todos los continentes salvo en África. Según la OMS, las gripes estacionales provocan tras su paso invernal entre 200.000 y 500.000 muertes anuales por lo que no se consideró especialmente grave aunque sí muy mediática. Ahora, investigaciones del Centro de Control de Enfermedades de Atlanta, el famoso CDC, afirman que el número de víctimas se acercó más al intervalo entre las 150.000-575.000, un 15 % superior a lo dicho en su momento por la OMS, que solo computaba los casos confirmados en laboratorio. Antes de irse, la enfermedad dejó otro titular: el 80 % de las muertes se registraron en pacien-



tes de menos de 65 años, cuando la gripe estacional suele golpear más a la población anciana. Hoy, tras incorporar esta cepa para de preparar el cóctel de vacunas que cada año decide la OMS en los meses del invierno en Asia, el virus de gripe A H1N1 es la cepa circulante principal de la temporada, pero ahora ya estamos preparados.

No lo estábamos sin embargo en 1997, en Hong-Kong, cuando el virus de la gripe aviar H5N1, bien conocido por afectar terriblemente a las aves domésticas —aunque no así a su reservorio natural, las aves silvestres— saltó por primera vez a las personas. Rápidamente se extendió por 15 países e infectó a 622 personas que desarrollaron neumonía severa y de las cuales 377 fallecieron, lo que sitúa la tasa de mortalidad cerca del 60 %. En su punto álgido, en el año 2006, causó el peor episodio de gripe aviar registrado en la historia, con millones de pollos muertos o sacrificados para evitar la propagación de la enfermedad.

De momento, este y otros virus aviares parecidos que han surgido esporádicamente, como el brote en China del pasado año por la cepa H7N9, raramente se transmiten entre humanos que se

contagian por contacto directo con animales infectados o ambientes contaminados. Pero para anticiparse a lo que puede suceder en la naturaleza, un equipo conjunto de la Universidad de Rotterdam y de la de Wisconsin-Madison se preparan para modificar genéticamente al H7N9, haciéndolo más virulento en laboratorio por si eso llegase a ocurrir en la vida real. Así podrían conocer por qué resiste el tratamiento con tamiflú, qué le falta para transmitirse entre personas y cuál puede ser su punto débil para atacarlo con una vacuna. Porque si adquirieran la capacidad de transmitirse entre humanos, estos virus podrían dar rienda suelta a una nueva pandemia.

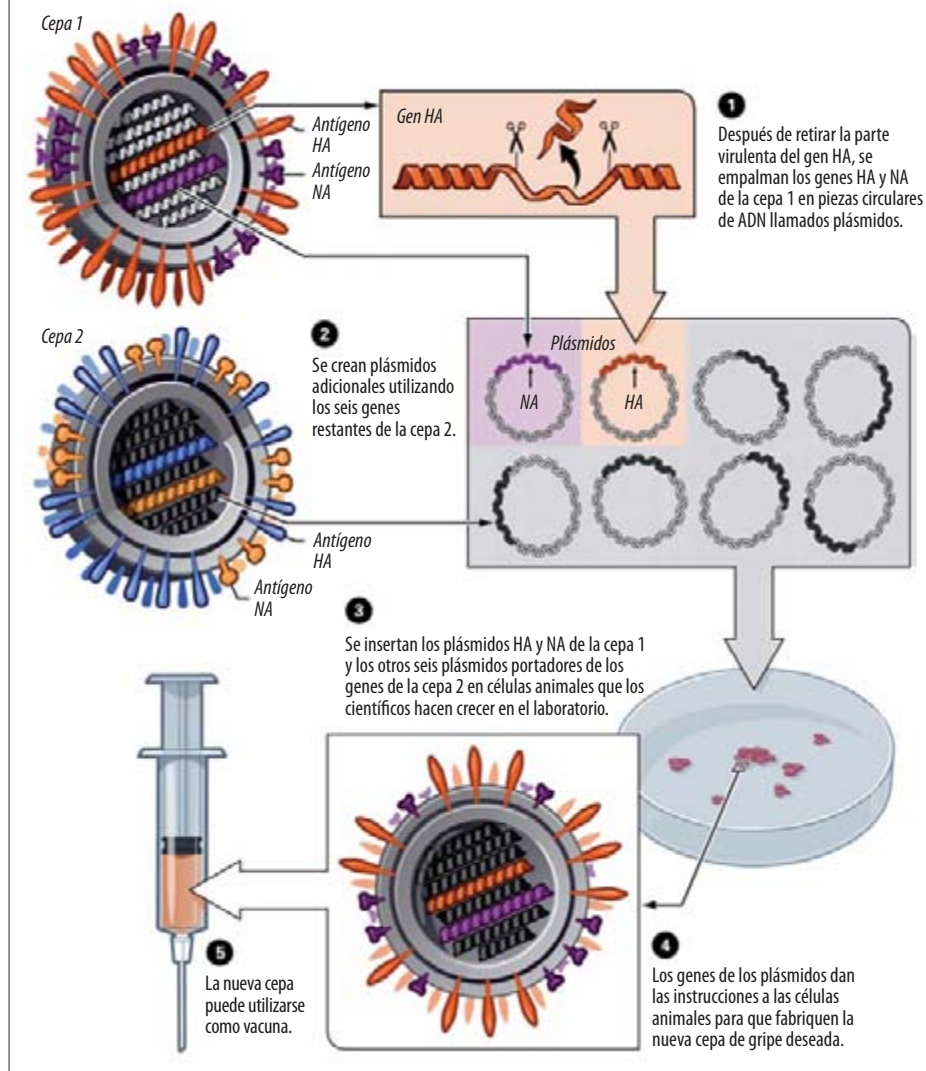
## Virus corona

Una de las líneas de investigación del equipo de Enjuanes es el diseño de vacunas para un tipo de virus que a la luz del microscopio electrónico parecen estar coronados con un anillo. Su nombre no podría ser otro: coronavirus. Aunque están asociados a resfriados comunes, si provienen de otra especie la cosa puede complicarse, y así ha pasado con dos de ellos en los últimos años: el virus SARS causante del síndrome respiratorio agudo severo, y el vi-

### Cómo se fabrica la vacuna de la gripe

Un virus de la gripe consta de ocho segmentos genéticos. Uno de ellos codifica el antígeno superficial de hemaglutinina (HA) y otro el antígeno de neuraminidasa (NA). Los científicos pueden fabricar a medida una cepa determinada ensamblando genes que codifiquen las características deseadas. La ilustración detalla los pa-

sos que se dan para la creación de una vacuna. Dos genes que representan los antígenos HA y NA se seleccionan de la cepa de destino (cepa 1) mientras que los seis genes restantes provienen de la cepa 2 (aunque el virus de la gripe tiene al ácido nucleico ARN como su material genético, los investigadores trabajan con cadenas complementarias de ADN por su mayor facilidad de uso).



rus MERS. El SARS es el causante de la famosa neumonía asiática, que en 2002 tiñó de mascarillas blancas las calles de Hong Kong, Pekín o Tokio mientras el resto del mundo contenía, casi literalmente, la respiración. El reservorio natural eran los murciélagos, pero el contagio a humanos se produjo a través de los roedores.

Con el SARS comenzó una carrera que sentó las bases de los actuales sistemas de vigilancia de enfermedades nuevas. Según Enjuanes, “debido a la buena tecnología se establecieron procedimientos de identificación muy rápidos, en cuestión de

horas se identificaba el virus en un paciente que acudía al hospital por problemas respiratorios graves. A los infectados se les aisló y se controló la diseminación del virus”. El SARS dejó a su paso más de 8.000 infectados y unos 700 fallecidos.

Estos planes no tuvieron que esperar mucho para ponerse en práctica. Hace poco más de un año, estalló en la península arábiga el brote de otra extraña enfermedad respiratoria aguda grave, con toda la pinta de tener origen vírico. Los pacientes llegaban a los hospitales con fiebre, tos, neumonía y afectación renal.

A toda velocidad se activaron los protocolos para aislar el virus, secuenciar su genoma y saber de dónde diablos venía. Se identificó como un coronavirus parecido al SARS cuyo origen parece estar en ciertas especies de murciélagos; se le llamó MERS-CoV.

El equipo de Enjuanes ha diseñado vacunas para ambos manipulando por ingeniería genética según esta secuencia muy simplificada: parten de un virus sintético al que le van quitando genes hasta que dan con el que hace que sea virulento, lo eliminan y lo convierten en un virus atenuado con el que infectan distintos modelos animales. Como está atenuado no produce la enfermedad, pero desata la respuesta inmunitaria. Es una vacuna. Aún no se han probado en humanos, pero ambas han dado protecciones muy altas en modelos experimentales.

“Sabemos perfectamente que hay muchísimos virus que todavía no conocemos. Antigüamente, el ser humano se movía en un radio de acción de muy pocos kilómetros pero ahora no hay límites a la movilidad humana y a la invasión de espacios naturales, con lo cual se pone en contacto con vectores como mosquitos o garrapatas que son transmisores de virus. Como además hay un millón de vuelos anuales, inmediatamente se transmite cualquier infección. Cada año aparecen alrededor de cuatro o cinco nuevos virus que afectan a los humanos y esto no va a parar en muchos años”, responde Enjuanes cuando se le pregunta qué es lo que más preocupa a un virólogo.

Hasta la fecha, el MERS se ha cobrado la vida de 58 personas, todas ellas padecían alguna enfermedad previa, de los 136 casos confirmados en 10 países, la mayoría en Arabia Saudí y en sus países vecinos, lo que sitúa la tasa de mortalidad próxima al 50 %. Es el último estallido de un virus nuevo, pero la gran pregunta que se hacen los virólogos sigue siendo la misma: ¿cuándo vendrá el siguiente? @

En mayo de 2011, dos meses después del terremoto y el *tsunami* que asolaron Japón y del accidente que, a consecuencia del segundo, sufrieron tres de los seis reactores de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi, el Gobierno japonés creó la Comisión de Investigación del Accidente de Fukushima, para analizar lo

sucedido, sus antecedentes y consecuencias, elaborar propuestas de actuación para paliar sus efectos y extraer las lecciones oportunas aplicables a la gestión futura del parque nuclear del país. A finales de ese mismo año la comisión fue disuelta, tras entregar el minucioso informe que había elaborado.

Yotaro Hatamura, presidente de la Comisión de Investigación del Accidente de Fukushima

## “En Japón no hay un regulador nuclear independiente y seguirá sin haberlo en el futuro”

■ Ignacio Fernández Bayo, periodista científico, director de Divulga ■

**A**l frente de dicha comisión independiente se colocó al ingeniero Yotaro Hatamura (Tokio, 1941), profesor emérito de la universidad de la capital nipona y actualmente, desde octubre de 2012, presidente del Comité de Seguridad de la Agencia Estatal de Consumidores de su país. Como portavoz principal de la comisión de Fukushima, Hatamura ha visitado numerosos países para dar a conocer los resultados del informe. Aprovechando su presencia en España, donde en el otoño pasado pronunció una conferencia en la Fundación Ramón Areces, *Alfa* mantuvo una entrevista con él, durante la cual señaló que “la gestión del accidente fue muy deficiente, entre otras cosas por la inexistencia de un regulador independiente. Ahora el Gobierno dice que eso ya está resuelto, pero

siguen siendo ellos los que deciden y ejecutan la supervisión. No hay un organismo regulador completamente independiente del Gobierno y no parece que lo vaya a haber en el futuro”.

A pesar de una declaración tan clara y crítica, la prudencia guía los juicios y opiniones de Hatamura, lo que no le impide difundir algunos datos llamativos sobre la evolución de la situación en la zona afectada: “Cada día muere una persona a consecuencia del accidente”, dice, y a continuación matiza “pero no a causa de la radiación, sino por el *ki*, un concepto japonés que se refiere al estado anímico, cuya alteración produce estrés o ansiedad, en este caso generado tanto por el accidente como por la situación en la que viven, desalojados de sus casas”. Según los datos reconocidos

oficialmente y aportados por el ingeniero japonés, durante el primer año y medio tras la tragedia, el número de fallecidos en la provincia de Fukushima fue de 1.121 personas, “y al menos dos tercios de ellos murieron como consecuencia del accidente. En los últimos seis meses han muerto otras 180 personas, por falta de adaptación a los cambios que se han producido en sus vidas”.

Las cifras son una aproximación a la realidad, pero vienen avaladas por un dato objetivo: el reconocimiento de derechos de indemnización que ha otorgado el Gobierno japonés, según explica Hatamura. El problema está lejos de ser solucionado, ya que de las 160.000 personas evacuadas tras el accidente, todavía no han regresado a sus hogares unas 150.000. “El problema es que el límite que



el Gobierno ha declarado para que la gente pueda regresar es muy bajo, de 1 milisievert/año, pero en mi opinión podrían regresar sin riesgos con límites más altos. Eso hace que la población tenga miedo a volver. Creo que son peores las consecuencias sobre la salud mental y física de las personas por estar fuera de su medio que el riesgo de la radiación. En Chernóbil la vida media de las personas evacuadas es siete años menor que la de las personas no evacuadas”. A mediados de noviembre, apenas unos días después de estas declaraciones, las autoridades

eliminaron ese límite, que pasó a ser considerado un “objetivo a largo plazo”, lo que permitirá a muchos regresar por fin a sus hogares.

El informe elaborado por la comisión que presidió Hatamura, que ocupaba más de 500 páginas, denunciaba numerosos errores cometidos por la empresa propietaria de la central, TEPCO, y por las autoridades, tanto en el diseño y mantenimiento de las instalaciones como en la gestión de la crisis. Dos años después de la presentación del informe, Hatamura resume en un concepto (“imprevisible”) la

incompetencia puesta de manifiesto y la principal lección que se puede extraer del análisis del accidente “decían que lo sucedido era imprevisible pero solo querían ocultar su falta de planificación. Es necesario ser capaz de prever más allá de lo evidente. Por mucho que se piense en todas las circunstancias posibles, siempre habrá algo que no se puede prever y por eso todo plan debe incluir contingencias imprevistas”. Esta idea es la que ha guiado los planes de acción en las centrales nucleares europeas que se han puesto en marcha a raíz del accidente.



Miembros de una misión del OIEA en las instalaciones de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi.

Otro aspecto que dejó en evidencia la organización de respuesta a la catástrofe: “Había un plan de prevención de desastres pero no se les había ocurrido tener uno por si acaso se producía el accidente. Ahora está claro que hay que estar preparados no solo para prevenir e impedir el accidente, sino también para minimizar los daños en caso de que ocurra”. Por ejemplo, explica, los oficiales del organismo regulador estuvieron en la planta durante el terremoto, pero abandonaron las instalaciones antes del tsunami. Tuvieron que volver, pero fueron de poca ayuda para restablecer el suministro eléctrico y encontrar fuentes de agua para refrigerar los reactores. “Tampoco los trabajadores de la central habían sido entrenados para gestionar fallos múltiples y carecían de un manual que les orientase. El análisis de las comunicaciones muestra que los trabajadores que se quedaron en la planta no sabían muy bien lo que estaba ocurriendo. En concreto, pensaban equivocadamente que los sistemas de refrigeración de emergencia estaban funcionando, lo que retrasó la búsqueda de medios alternativos para enfriar los núcleos”.

La misma falta de planificación hizo que no funcionara adecuadamente el

sistema de detección de dispersión de material radiactivo y se retrasaron mucho las labores de evacuación, que, además “no fueron tan eficientes como deberían haber sido y por eso se produjo un

*No basta con que la regulación sea más estricta. Las personas tienen que ser conscientes de lo que hacen y trabajar con seguridad*

daño medioambiental que podía haberse evitado y que aún continúa. Esto hizo que muchas poblaciones tuvieran una exposición innecesaria a la radiación”.

Sobre las acciones que se deben realizar en la zona para recuperar cuanto antes la normalidad, Hatamura opina que “no se están haciendo los esfuerzos necesarios para reparar las tierras contaminadas. El procedimiento sería hacer un agujero en el suelo, rascar la superficie

contaminada, enterrar esa tierra y volver a traer suelo limpio. El Gobierno, sin embargo, decidió emprender acciones mucho más complicadas pero más aparentes, para tranquilizar a la población”. De momento, según dice, “se están concentrando los esfuerzos en las zonas agrícolas y residenciales, pero estas suelen estar cerca de los bosques y en ellos es mucho más difícil actuar; se pueden limpiar árboles de hasta cuatro metros de altura, pero no los que tienen más, y no tendría sentido tampoco cortarlos”.

Hizo Hatamura también una reflexión sobre la importancia de la cultura de seguridad al señalar que “no basta con que la regulación sea más estricta. Son las personas las que tienen que ver y pensar por sí solas para ser conscientes de lo que están haciendo y trabajar con seguridad; si no, es posible que vuelvan a ocurrir accidentes de esta naturaleza”.

Por último, se refirió a la posibilidad de que Japón vuelva a confiar su suministro eléctrico a las centrales nucleares, la mayor parte de las cuales se encuentran actualmente paradas. “Personalmente no estoy ni a favor ni en contra de la energía nuclear, pero antes de reabrir las plantas hay que pensar en los riesgos. Antes del accidente se decía que la energía nuclear era muy segura y después se ha demostrado que no es así. Son los japoneses los que tienen que decidir, pero deben hacerlo con conocimiento. La percepción actual de la población es de rechazo, pero es probable que cambie en el futuro, porque los japoneses siempre han querido tener un suministro fiable e igualitario, con acceso para todos. Hace unos 60 años se hizo el esfuerzo de crear centrales hidroeléctricas, pero no fue suficiente y por eso se instalaron las plantas nucleares. En el futuro, cuando se vea que hay un aumento de la demanda y que no hay suficiente oferta, es posible que los japoneses cambien de opinión. Es una decisión del pueblo japonés”.



Recuperada la memoria de Mónico Sánchez, el inventor y pionero de la electrotecnia en nuestro país, que desarrolló el primer aparato portátil de rayos X

## Un Edison a la española

No anda sobrada España de genios de la ciencia y la tecnología como para dejar caer en el olvido a algunas de sus figuras más destacadas, aunque así ocurre con frecuencia. En ese olvido dormía Mónico Sánchez Moreno, un manchego de origen humilde que protagonizó una historia deslumbrante a lo largo de un recorrido que le llevó a hacerse ingeniero eléctrico en Estados Unidos, en la época protagonizada por Edison y Tesla, patentar el primer aparato de rayos X portátil y participar en otros muchos inventos, incluido el desarrollo de un teléfono inalámbrico. El catedrático de Física Nuclear de la Universidad de Sevilla, Manuel Lozano Leyva, ha publicado una biografía de este personaje singular, que ha permitido devolverle su justa fama. ■ Texto: **Pablo Francescutti** | periodista científico, profesor de la URJC ■

Quien visite la Sala de la Innovación Española en la sede coruñesa del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (Muncyt) —un escaparate de la ciencia que se ha realizado y se realiza en España—, se encontrará con una fascinante colección de toda clase de tubos de descarga (tubos de Crookes, de Holtz y de Geissler), lámparas luminiscentes, esferas de vacío, aparatos de electroterapia y un curioso generador de rayos X. ¿Qué tiene esto que ver con la tecnología *made in Spain*?, se preguntará el visitante poco informado. Pues mucho, en la medida en que proceden del desaparecido Laboratorio Eléctrico Sánchez, localizado en Piedrabuena (Ciudad Real).

Detrás de las vitrinas se exponen los restos de una aventura empresarial casi temeraria, las reliquias de vidrio y metal de una de las proezas tecnológicas menos conocidas de nuestra historia, el

legado de una gesta de la I+D llevada a cabo cuando estas siglas aún no se habían inventado. Ninguna de las 310 piezas conservadas por la familia Sánchez tras el cierre del laboratorio en 1961 resume mejor esa gesta que el “Aparato de rayos X portátil y corrientes de altas frecuencias” pergeñado en Estados Unidos por el protagonista de la hazaña, el artefacto sobre el que pivota la gloria y fortuna de Mónico Sánchez Moreno, uno de los inventores más notables que dio el país.

### Un pionero universal

Valorar en su justa medida la trascendencia de ese hito requiere situarlo en su contexto. Es preciso recordar que los rayos descubiertos en 1895 por Wilhelm Roentgen habían sido domesticados a toda prisa. Lo prueba su uso médico, que se popularizó a una velocidad pasmosa. A principios del siglo XX ya se producían rayos X mediante un tubo de Crookes y un generador de alta tensión. Sin embargo, la difusión de estos artefactos chocaba con un obstáculo en apariencias insalvable: “los generadores pesaban 400 kilos e impedían que esta herramienta de diagnóstico llegara al grueso de la población”, recuerda Eduardo Esteban Sánchez, nieto del inventor. “La verdadera innovación de mi abuelo fue reducir-

lo a un aparato de apenas ocho kilos que se podía transportar en una maleta”.

“Como señalaba la publicidad del aparato, era el más sencillo, económico y útil”, añade Sánchez, quien explica su funcionamiento: “Se conectaba el cátodo, a continuación se ponía el soporte donde se fijaba el tubo de rayos X, y se activaba el interruptor, y con una rueda se regulaba su intensidad”. Hasta entonces, “para la producción de rayos X era necesaria una máquina electrostática o una bobina de inducción que diera corriente de alto potencial”, señalan Lorenza Ruiz Ortega y Yolanda Torres Sousa, radiólogas del Hospital Universitario de Ciudad Real, que son categóricas en su juicio sobre esta innovación: “El aparato portátil de rayos X Sánchez supuso una auténtica revolución dentro de las aplicaciones de la electricidad en medicina, porque el equipo se montaba y ponía en funcionamiento en menos de cinco minutos”.

No era poca cosa para un manchego de 27 años de edad, que no había cursado siquiera el bachiller elemental. ¿Cómo había podido realizar tal hazaña?

### Un tenaz autodidacta

La historia de Mónico Sánchez es digna de una película de Frank Capra, el cantor

del “sueño americano”, pues su vida es la de un inmigrante que llega a Estados Unidos sin más recursos que una mente despierta, iniciativa y tenacidad, y logra descollar como inventor y hacerse rico.

A todas luces, la suya es una trayectoria extraordinaria. Justo en los años en que Unamuno profería su tristemente célebre “Que inventen ellos”, un españolito se iba con “ellos”, los anglosajones, y se ponía a inventar y patentar. No sorprende en absoluto el interés que ha despertado su figura, cuyo rescate del olvido viene siendo llevado a cabo por admiradores de su obra, como el ingeniero de telecomunicaciones Juan Pablo Rozas Quintanilla, instituciones como el Muncyt, o, más recientemente, por un avezado divulgador de la talla del catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla, Manuel Lozano Leyva, en cuyo libro *El Gran Mónico* recrea la “insólita aventura de un ingeniero manchego en tiempos de crisis”.

En esas páginas, Lozano Leyva narra cómo el hijo de un tejero y una lavandera, nacido en 1880 en un pueblo de La Mancha, abandonó la escuela para ayudar a su familia como dependiente de comercio, hasta que, cumplidos los 21



Retrato de Mónico Sánchez. A la derecha, el inventor manchego enseña su aparato de rayos X en el Madison Square Garden de Nueva York, en 1909.

## El hombre idóneo en el lugar y momento adecuados

Cuando Roentgen descubrió una radiación electromagnética completamente desconocida, su índole ignota le llevó a denominarla "X", como se acostumbra hacer para aludir a cosas o personas no identificadas (aunque en su Alemania natal siguieron llamándolos rayos Roentgen durante décadas). Más tarde se supo que esta radiación ionizante es emitida por electrones, y aunque resulta potencialmente peligrosa para los tejidos vivos, su capacidad para atravesar objetos densos y opacos, sin ser absorbida o dispersada, desencadenó la revolución del diagnóstico por imagen.

En pocos días el descubrimiento realizado en Würzburg (Baviera) se difundió por telegrafía al mundo. Igual de fulminante fue el desarrollo de sus aplicaciones: en enero de 1896, a un mes de publicado el hallazgo, ya se habían sacado las primeras radiografías médicas; y a mediados de ese año, Edison lanzaba el primer aparato comercial de rayos X, el fluoroscopio. Enseguida se desató una carrera tecnológica por mejorar este sistema; una carrera mundial



Vestíbulo del Museo de la Inmigración de Ellis Island.

que en gran medida se disputaba en el estado de Nueva York, y en la que participaban ingenieros, inventores y emprendedores de todo tipo. En esas propicias circunstancias desembarcó Mónico Sánchez en Ellis Island: el hombre adecuado, en el momento adecuado, en el lugar adecuado. ▀

años y con unos ahorros en el bolsillo, se instaló en Madrid con la intención de aprender electrotecnia. Que al mozo le picase el gusanillo de la electricidad no resultaba demasiado raro en una época de fervoroso entusiasmo por la energía eléctrica, que estaba cambiando la faz de las ciudades. Lástima que entre él y su

anhelo se interpusiera la dura realidad, pues la universidad estaba cerrada a cal y canto a las clases humildes. Lejos de amilanarse, el joven se apuntó al curso de electrotecnia por correspondencia dictado desde Estados Unidos por el ingeniero Joseph Wentzler. Y lo hizo con tanta aplicación, esforzándose por aprender

inglés sobre la marcha, que el propio Wentzler, admirado del tesón de ese lejano alumno, le contactó por carta. Del intercambio epistolar surgió la sugerencia de que continuase sus estudios en la sede neoyorquina de su instituto de formación profesional; en paralelo su protector le prometió conseguirle



Mónico Sánchez, en una exposición de sus aparatos. A la derecha, demostración del funcionamiento del generador portátil de rayos X Sánchez.



Tomando una radiografía de la mano de una mujer. A la derecha, aplicación del generador portátil de Mónico Sánchez con un inhalador de ozono.

un trabajo para que se mantuviera mientras estudiaba.

Así fue cómo el manchego se embarcó para Estados Unidos a los 24 años. Se estableció en Nueva York, y al cabo de tres años ya tenía su diploma de “ingeniero”, un título equivalente al antiguo perito industrial, explica Lozano. En paralelo, se ganaba la vida en la fábrica de telégrafos Foote, Pierson & Company. Con este empleo se metió de pleno en el furor por la electricidad, atizado por la “guerra de las corrientes” entre Nikola Tesla y Thomas Edison. El paso decisivo lo dio en 1908, al ser fichado para un cargo de responsabilidad por Van Houten & Ted Broek Co., fabricante de instrumentos de electromedicina. Esta especialización industrial determinaría su futuro.

Pronto demostraría el avisado inmigrante que no era de conformarse con posiciones subalternas y, sin abandonar su puesto en Van Houten, puso en marcha sus proyectos personales. De entrada patentó una mejora del puente de Wheatstone, un dispositivo medidor de la resistencia eléctrica. A continuación, se abocó a utilizar el generador de corriente alterna ideado por Tesla para obtener altos voltajes con bobinas de pequeño tamaño. Esta estrategia —miniaturización de componentes, la llamaríamos

hoy— le permitió diseñar un emisor de rayos X portátil de dimensiones reducidas, consistente en una caja de madera con una fuente de alta tensión y un tubo de rayos catódicos en su interior. “Su mayor logro técnico fue utilizar con provecho la alta frecuencia de la corriente alterna para implementar fuentes de alta tensión”, resume su biógrafo sevillano.

La patente y comercialización de su máquina le deparó fama y dinero, y el eco de su hazaña no tardó en resonar en la Península. En 1910, fue invitado al V Congreso Internacional de Radiología y Radiologías Médicas, celebrado en Barcelona, y tan buena acogida tuvieron él y su invento que decidió volver a su patria. Dicho y hecho: tras liquidar sus activos estadounidenses, “embarcó rumbo a España en 1912, rico de verdad, con 32 años y la cabeza llena de proyectos”, escribe Lozano, para quien el contraste no podía ser mayor: “Habían transcurrido poco más de nueve años desde que llegara a América como inmigrante con 60 dólares por todo capital”.

### Regreso con gloria

A diferencia de los indianos que retornaban al terruño para hundirse en la vida muelle del rentista, Mónico apostó por una salida de lo más inusual: regresar a

Piedrabuena con la idea de convertirse en un capitán de industria al frente de la European Electrical Sánchez Company.

Cumplir ese plan obligó al hijo del tejero y la lavandera a resolver arduas cuestiones de logística. Por un lado, debía garantizarse un suministro eléctrico constante, asunto que resolvió con la construcción de una central térmica alimentada con el agua del Guadiana y carbón traído por bueyes —con la ventaja adicional de traer luz y agua corriente a su pueblo natal—; por el otro, necesitaba fabricar los tubos de vacío requeridos por su aparato, para lo cual se trajo un soplador de vidrios de Alemania. Solventados ambos problemas, en 1913 levantó, pegado a la central, el Laboratorio Eléctrico Sánchez, una instalación de 3.500 metros cuadrados que, a juicio de Lozano, se convirtió “posiblemente en el centro de tecnología más avanzada del país”.

La flamante fábrica se enfrentó enseguida a una gran prueba: la guerra mundial que estalló al año siguiente. Y la superó con holgura, ya que el Gobierno francés, a instancias de la Premio Nobel de Química Marie Curie, a la sazón responsable de las unidades radiológicas que operaban en el frente, acabó por comprarle al laboratorio manchego 60 de sus equipos portátiles. Esta operación comercial



Uno de los componentes electrónicos fabricados por Mónico Sánchez. Imagen procedente de un folleto comercial sobre el aparato portátil de rayos X Sánchez.

fue la mejor publicidad que podía recibir una industria emergente.

En la posguerra los negocios no dejaron de prosperar; en igual medida lo hizo el prestigio de Sánchez: lo prueban la medalla de oro que le otorgaron en la Exposición Internacional de Barcelona de 1929 y el doctorado *honoris causa* concedido por la Facultad de Ingeniería de Río de Janeiro. En los años 30, le encontró una nueva utilidad a sus equipos: “la demostración de fenómenos electrofísicos en el ámbito de la enseñanza”, recuerda su nieto. La aplicación tuvo éxito y los aparatos montados en Piedrabuena se exportaron a Europa y América Latina. “Los equipos eran tan robustos y estaban tan bien hechos que aún se pueden encontrar infinidad de ellos en centros educativos. Y gran parte de estos aparatos están en perfecto estado, no solo de conservación, sino de funcionamiento”, comenta Lozano.

Había más planes, y en ellos la electroterapia ocupaba un lugar central. “En el futuro las tres cuartas partes de la práctica médica se basarán en la electrología”, vaticinaba Mónico, convencido del efecto benéfico de las corrientes de altas frecuencias en toda suerte de patologías. Movido por esa certeza abrió en Piedrabuena una consulta en la que el doctor Ruiz Ibarra aplicaba sus electrodos,

refiere el médico Tomás Cabacas. Soñaba con crear una Escuela de Electroterapias destinada a formar especialistas, un sueño que no se concretó y del cual subsisten

*En condiciones más  
adversas que las actuales,  
es posible llevar a cabo  
proezas admirables y  
a priori imposibles para el  
bienestar propio y del país*

como testimonios los inhaladores de ozono, electrodos vacuos de cristal y electrocauterios expuestos en el Muncyt.

### Obsolescencia técnica

Esta venturosa trayectoria se torcería antes de que acabase la década de los 30. El primer golpe se lo asestaron los coletazos de la Gran Depresión; el segundo, la Guerra Civil, cuando su fábrica fue incautada por los milicianos. Recuperada la empresa al término de las hostilidades, el inventor constató que su tecnología de rayos X se había quedado obsoleta y

no podía competir con las novedosas lámparas de Coolidge, que regulaban con mayor exactitud las dosis de radiación. Buscó una alternativa en la importación de los aparatos más punteros en electromedicina, pero la autarquía impuesta por el franquismo se lo impidió. En los años siguientes, el laboratorio iría cuesta abajo, y finalmente la muerte de su dueño, acaecida en 1961 a los 81 años, le echaría el cerrojo definitivo.

De la vida y obra relatada, Lozano Leyva saca dos lecciones. La primera tiene que ver con la incapacidad de Mónico Sánchez para superar el reto planteado por la inevitable obsolescencia tecnológica. A diferencia de geniales inventores como Steve Jobs o Bill Gates, él no supo rodearse de gente brillante con la que hacer sinergias y generar un flujo constante de innovaciones. La segunda lección, la moraleja de esta historia de regusto agri dulce, va dirigida a los jóvenes investigadores desanimados por la crisis económica: “que vean que en condiciones enormemente más adversas que las actuales, es posible no solo salir adelante, sino llevar a cabo proezas admirables y *a priori* imposibles para el bienestar propio y del país”, apunta el catedrático, “O sea, que el (supuesto) destino es siempre evitable”.

La alta incidencia de cáncer en la población, junto al creciente éxito en su curación, está poniendo de manifiesto los efectos secundarios debidos a los tratamientos de radioterapia. Uno de ellos es la aparición de un segundo cáncer como consecuencia de la radiación periférica, que se recibe fuera de la zona de tratamiento y que se extiende a todo el cuerpo. Un componente de esta radiación es la contaminación neutrónica. El gran beneficio que supone la curación del cáncer primario y la complejidad de la medida han sido las causas por las que, prácticamente en todo el mundo, no se ha considerado este problema a la hora de elegir la

mejor estrategia de tratamiento. Nuestro grupo, en colaboración con otras instituciones, ha abordado y liderado internacionalmente este problema, desde la física básica hasta la solución clínica. Conocemos ya lo que está pasando y cómo establecer los mecanismos para evitarlo o reducirlo. Es pues el momento oportuno para trasladar estos conocimientos desde el campo de la ciencia a la clínica, y de desarrollar dispositivos más operativos de cara al establecimiento de medidas legislativas que permitan el control de esta dosis periférica.

■ Texto: **Francisco Sánchez Doblado** | catedrático de Fisiología de la Universidad de Sevilla\* ■

# Protección del paciente en radioterapia: riesgo de un segundo cáncer por la radiación periférica

## Introducción

La radioterapia representa, desde hace más de un siglo, una de las herramientas básicas para el tratamiento del cáncer. Su objetivo es dual: la destrucción del tumor mediante radiaciones ionizantes y la salvaguarda de los posibles órganos sanos implicados. Los resultados en ambas facetas han ido mejorando de forma notable a lo largo de más de un siglo de historia y se ha logrado un mayor éxito en la curación y un descenso de las complicaciones. Todo esto ha sido en gran medida una consecuencia del grado de tecnificación que la sanidad moderna ha logrado en esta especialidad clínica (de los más altos en el área de la terapia).

No obstante, es de todos conocido el hecho paradójico de que las radiaciones ionizantes, usadas como eficaz medio terapéutico contra el cáncer, también representan una de las posibles causas para la

generación de nuevos procesos neoplásicos. Numerosos estudios científicos avallan toda una estricta legislación para el uso de las radiaciones en el campo profesional, la población en general o el medio ambiente. Sin embargo, es relativamente reciente la implantación de estos conceptos para la protección específica de los pacientes (es en la ICRP 103/105 donde se contempla, ya de forma explícita, la protección del paciente como uno de los frentes importantes de actuación). Aun así, dicha normativa solo alude a situaciones en el ámbito del radiodiagnóstico, pero no hay normativas internacionales en lo referente a la protección radiológica del paciente sometido a tratamientos de radioterapia. En particular, en el objetivo terapéutico que antes se mencionaba, el estudio exhaustivo de dosis-riesgo se circunscribía a la zona próxima al tumor, notablemente afectada por dicho agente nocivo. El resto del cuerpo, vinculado a lo que actualmente se conoce como la dosis periférica

y de la misma índole que la que puede afectar a cualquier profesional expuesto, prácticamente no ha sido nunca considerada en la rutina clínica de ninguna institución del mundo. Esta actitud ha estado basada, fundamentalmente, en la justificación de la relación riesgo-beneficio que supone para un paciente afectado de una patología “fatal” como la del cáncer. No obstante, en los últimos años la preocupación por esta dosis de radiación, inicialmente considerada insignificante, que adicional e innecesariamente reciben los pacientes, ha crecido drásticamente.

Ello se pone en evidencia a juzgar por el número de publicaciones científicas que analizan este problema<sup>[1]</sup>. Este hecho, está sin duda unido al aumento de los efectos colaterales que están apareciendo, al cabo de los años, en los pacientes tratados y que han superado la enfermedad. Esta preocupación generalizada y en aumento es consecuencia de múltiples factores, entre ellos:

\* ver apartado autores y colaboradores

a) La enorme población afectada, ya que más de 12 millones de nuevos pacientes son diagnosticados de cáncer cada año y de los cuales al menos un 50 % reciben Radioterapia como parte de su tratamiento<sup>[2]</sup>.

b) El gran porcentaje de éxito, que garantiza una alta expectativa de vida (20 % de disminuciones de muerte por cáncer en los últimos años, de acuerdo a la sociedad norteamericana del cáncer<sup>[3]</sup>), lo que permite ver la aparición de efectos no deseados a medio y largo plazo; uno de los más representativos resulta ser el segundo cáncer; y por último

c) Las nuevas técnicas, que están consiguiendo con mayor eficacia el objetivo radioterápico desde el punto de vista clásico (aumento de la supervivencia libre de enfermedad), a la vez que se vuelven más demandantes en términos de dosis periférica<sup>[4]</sup>. Uno de los estudios epidemiológicos más completos y recientes, publicado por Berrington *et al.*<sup>[5]</sup>, basado en los registros de cáncer de EE.UU., concluye que el 8 % de los segundos cánceres diagnosticados en pacientes supervivientes de un primer cáncer, tras un tratamiento con radioterapia, es atribuible al tratamiento con radiaciones ionizantes.

### Acciones llevadas a cabo

Haciéndose eco de este problema y siguiendo las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)<sup>[6]</sup>, varios grupos de diversos países han venido trabajando en este campo. En particular, nuestro grupo de la Universidad de Sevilla (FIUS) y el Hospital Virgen Macarena, con la colaboración de investigadores españoles de varias instituciones (Universidad Autónoma de Barcelona, Universidad de Santiago de Compostela, Ciemat y Universidad Católica de Chile) y la importante ayuda de otros muchos profesionales sanitarios (de más de 30 hospitales de Europa, América y fundamentalmente españoles) ha llegado a constituir uno de los grupos más importantes que lideran este tema en el mundo. En particular, hemos centrado nuestros estudios en la dosis neutrónica, al tratarse de la más compleja en cuanto a su interacción (v. siguiente apartado). Si bien, para los fotones (la otra radiación principal que contribuye a la dosis periférica) existen mecanismos dosimétricos bien conocidos para valorar el impacto que pueden tener en los pacientes, no es igual para la contribución neutrónica<sup>[1]</sup>. No solo no existía la posibilidad operati-

va de medir dicha radiación en un entorno de aceleradores clínicos, con una alta componente fotónica, sino que además la asignación de dosis a órganos, como paso previo a la valoración de los riesgos, era un problema no abordado en los procedimientos existentes en el campo de la protección radiológica. Esto, unido a la necesidad de estimar, en el interior del paciente, no solo la fluencia neutrónica sino también el espectro energético asociado a su repercusión radiobiológica, constituyó sin duda un reto importante.

En el año 2007 se presentaron en el congreso de la Sociedad Europea de Radioterapia Oncológica (ESTRO) los resultados de un prototipo muy elemental, que podría servir de base para el desarrollo de un detector neutrónico para su uso en radioterapia<sup>[7]</sup>. Posteriormente se desarrollaron dispositivos más elaborados y se realizaron numerosas pruebas experimentales en los aceleradores clínicos, gracias a las ayudas oficiales obtenidas y a la colaboración con empresas del sector aeroespacial (v. apartado “Sistema activo para la dosimetría neutrónica en radioterapia”). Los resultados hicieron suponer que por fin podría ser viable la estimación de la dosis neutrónica en pacientes<sup>[8]</sup>. En cualquier caso, la dificultad más importante que se planteaba era correlacionar los eventos acumulados en el detector ubicado en la sala con lo que en realidad está recibiendo el paciente (v. apartado “Estimación de la dosis”). Gracias a un acuerdo con el Consejo de Seguridad Nuclear, que en todo momento mostró un gran interés por el tema, se pudieron cubrir con éxito todos los objetivos propuestos<sup>[9]</sup>. Ello ha permitido, finalmente, que la comunidad científica no solo reconozca el problema, sino que considere necesario introducir este nuevo control de la dosis periférica en pacientes para la toma de decisión sobre cuál es el tratamiento óptimo de entre las alternativas posibles (v. apartado “Análisis de riesgo”).

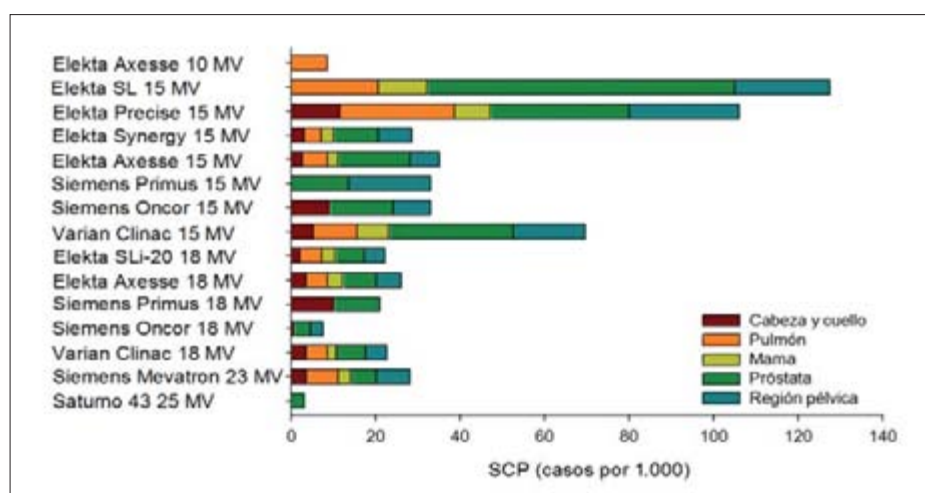


Figura 1. Probabilidad de adquisición de un segundo cáncer (*Second Cancer Probability*, SCP) para los diferentes aceleradores y patologías más frecuentes, modificado de Xu XG, Bednazz B y Paganetti H<sup>[10]</sup>. De la gráfica se extrae una probabilidad media de 1,2 % de desarrollo de un segundo cáncer lo que implica que, estimando 1,5 millones/año de pacientes supervivientes (tratados con alta energía como parte o totalidad de su tratamiento) más de 10.000 desarrollarán un segundo cáncer debido al tratamiento recibido.

Prueba de ello es la publicación en la revista de mayor impacto del mundo en temas de radioterapia oncológica, de uno de nuestros trabajos, donde se valoran 1.377 pacientes en unas 50 instalaciones, y se llega a obtener una estimación de los riesgos para las 14 patologías más frecuentes y las 15 modalidades de aceleradores, que constituyen la práctica totalidad de máquinas existentes (figura 1)<sup>[10]</sup>.

### Contaminación neutrónica en radioterapia

Durante la segunda mitad del siglo XX, la radioterapia externa ha aumentado la energía de tratamiento con el objetivo de tratar tumores profundos. Este logro ha sido posible gracias al desarrollo de nuevos aceleradores, que actualmente alcanzan hasta 25 MeV en los haces de electrones primarios. Los haces fotónicos empleados para el tratamiento de pacientes, se obtienen a partir de la radiación de frenado de estos electrones en un blanco con un alto número atómico, como oro o tungsteno.

La emisión de neutrones se produce principalmente en materiales de alto Z (W, Pb, Fe, Cu, etc.) presentes en los componentes de la cabeza del acelerador (blanco, filtro aplanador, mandíbulas, colimador, imán de curvatura, protecciones, etc.) mediante reacciones fotonucleares ( $\gamma, n$ ). Estas se producen como consecuencia de la presencia en el haz de fotones con energía más elevada que la de umbral de la reacción fotonuclear. Aunque también hay producción de neutrones en otros tipos de reacciones, como las electronucleares ( $e, e'n$ ) o ( $\gamma, 2n$ ) y ( $\gamma, pn$ ), son menos importantes debido a su menor sección eficaz. La energía mínima requerida para arrancar un neutrón de un núcleo, para aquellos más estables y pesados que el carbón, se encuentra entre 6 y 16 MeV. Sin embargo, debido a los materiales presentes en las salas de tratamiento, para modalidades fotónicas de megavoltaje por

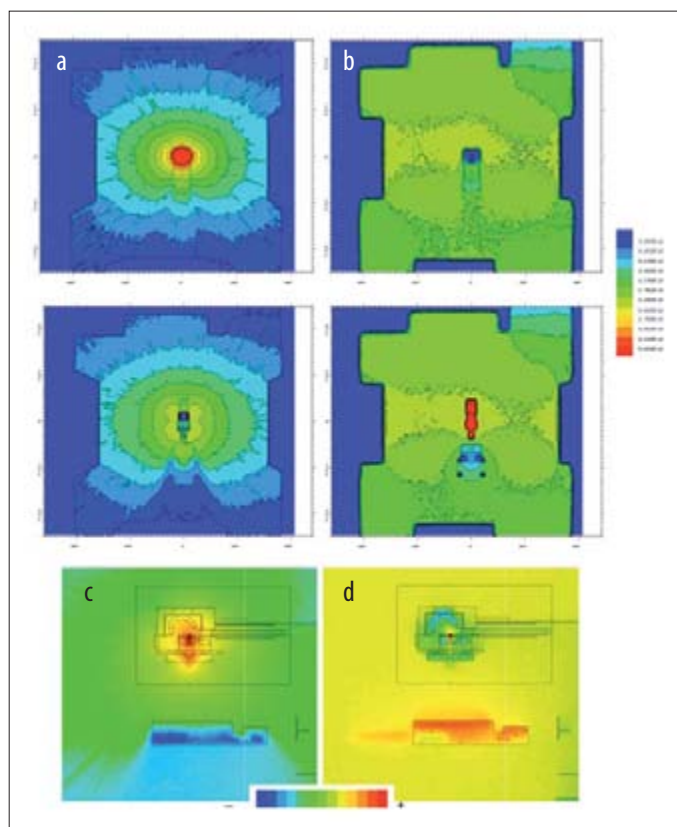


Figura 2. Distribución neutrónica en la sala de tratamiento simulada con Monte Carlo [11]. Simulación en la cabeza del acelerador (arriba) y a la altura del paciente (abajo) para el caso de: (a) neutrones rápidos y (b) térmicos. Distribución de neutrones (c) rápidos y (d) térmicos en el proceso de termalización experimentado en el interior del paciente.

debajo de 10 MV, la producción de neutrones es despreciable.

La cuantificación de este fenómeno, tanto simulada como a partir de medidas experimentales, se realizó en los años 70-80, y se concluyó que su importancia era mínima tanto para el personal profesionalmente expuesto como para los pacientes; se asumieron algunas acciones en materia de protección radiológica. No obstante, la radioterapia moderna junto al incremento de la supervivencia han cambiado sustancialmente ese escenario<sup>[1-5]</sup>.

Los fotoneutrones primarios, originados en un proceso de evaporación, atraviesan la cabeza del acelerador (con energías en torno a 1 MeV en haces clínicos de 10-25 MV). Estos neutrones sufren un gran número de interacciones con los diversos elementos presentes en el búnker (principalmente las paredes) y son termalizados. Así, el espectro energético de los neutrones en la sala de radioterapia comprende desde MeV hasta unos pocos

MeV. La fluencia de la componente térmica es prácticamente uniforme en la sala de tratamiento, mientras que para la componente rápida, el comportamiento es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (figura 2)<sup>[11]</sup>. Para un tratamiento de intensidad modulada dado, la fluencia neutrónica es del orden de varios millones por  $\text{cm}^2$ , por cada Gy de fotones suministrado al paciente ( $0,57 \times 10^6$ ,  $8,7 \times 10^6$  y  $13,6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$  para 10, 15 y 18 MV respectivamente<sup>[12]</sup>).

### Sistema activo de medida de la fluencia de neutrones dentro de las salas de radioterapia

La medida de la fluencia de neutrones en el interior de las salas de radioterapia se ha abordado hasta ahora mediante detectores pasivos. Este hecho es consecuencia del gran número de fotones presentes durante el tratamiento, que requiere un alto factor de rechazo a la detección gamma para poder obtener lecturas fiables. Adicionalmente los



Figura 3. Localización del detector de neutrones térmicos en la sala de tratamiento. Vista (a) externa e (b) interna del detector.

Figura 4. Colección de modelos antropomórficos desarrollados para simular distintos materiales y grupos de pacientes.



aceleradores clínicos producen haces de radiación pulsados tanto de fotones como de neutrones por reacciones fotonucleares. La elevada tasa de señal en el momento de disparo supone que la mayoría de los contadores activos siguen la frecuencia de pulsos de disparo del acelerador lineal (*linac*), dando lugar a lecturas sesgadas de la componente neutrónica. Por este motivo, los métodos aceptados de la medida de fluencia de neutrones en radioterapia se basan en procedimientos pasivos, como la activación de láminas de materiales adecuados, la dosimetría termoluminiscente o la producción de burbujas en líquidos especiales. Existe, sin embargo, un factor diferencial entre las interacciones nucleares de los neutrones y los productos de las interacciones electromagnéticas de los fotones: la elevada transferencia lineal de energía (LET) de los fragmentos nucleares proveniente de las reacciones de neutrones con los núcleos presentes en la sala. Por ello, se desarrolló un dispositivo digital basado en memorias estáticas de acceso aleatorio (SRAM), que actúan como una pluralidad de detectores donde cada celda de memoria es un detector de umbral solo sensible a las partículas de alto LET (figura 3). Seleccionando memorias con

boro-fósforo-silicato (BPSG) hemos conseguido un sistema sensible a los neutrones e insensible a los fotones, que permite su lectura como un contador de las interacciones individuales que han dado lugar a un cambio de estado (*Single Event Upset* o SEU) de una celda digital de memoria. Este sistema activo funciona dentro de una sala de radioterapia sin sufrir apilamiento ni saturación o interferencia con la componente de fotones del campo de radiación.

El sistema desarrollado<sup>[13]</sup> por la Universidad de Santiago de Compostela y el Ciemat está basado en 128 memorias SRAM con un total de 64 MiB en una sola tarjeta, de dimensiones  $20 \times 30 \text{ cm}^2$  aproximadamente. El equipo consta de un microprocesador que realiza las tareas de escritura y lectura de los contenidos de la memoria. La comunicación con un *software* de control, en un ordenador remoto exterior a la sala de radioterapia, se realiza mediante una interfaz RS-232, con un tiempo total de lectura en torno a 2 segundos. El detector se coloca normalmente en el eje del *gantry*, en un punto próximo a la pared del *bunker*, ya que de esta forma hemos demostrado que es independiente de las angulaciones de incidencia de los haces de radiación usados en el tratamiento<sup>[14]</sup>.

### Estimación de la dosis

Las lecturas del detector han sido previamente correlacionadas con la medida de la dosis equivalente en órganos en el interior de un maniquí antropomórfico para un conjunto de tratamientos estándar, y permite evaluar los coeficientes que estiman el riesgo de cáncer secundario por neutrones, a partir de la medida inmediata del sistema externo basado en SRAM<sup>[9]</sup>.

Los detectores pasivos ubicados en 16 puntos, estratégicamente distribuidos en el maniquí, fueron de CR-39 y TLD. Con ellos se obtuvieron las fluencias neutrónicas en dichos puntos, sometidos a las diversas pruebas y tratamientos. La dependencia de la energía de los neutrones con la dosis absorbida y sus consecuencias biológicas, supuso uno de los retos más importantes para poder aplicar a los modelos de riesgo, para estimar la probabilidad de adquirir un segundo cáncer. Para ello, se hicieron medidas espectrométricas con un conjunto de esferas Bonner y se correlacionaron con simulaciones Monte Carlo. Todo ello, nos permitió calcular con garantía los espectros en el interior del maniquí antropomórfico y descubrir la independencia con el tipo de acelerador o energía del haz, así como del tamaño o forma de los campos de trata-

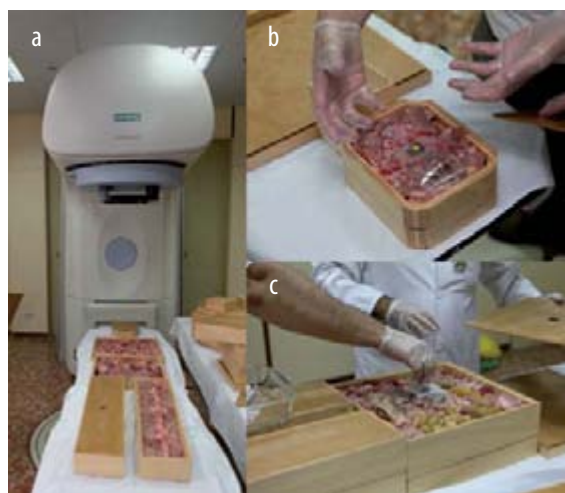


Figura 5. (a) Preparación del maniquí de tejido equivalente en la sala de tratamiento, (b) y (c) detalles de la composición y ubicación del detector en cabeza y abdomen.



Figura 6. Sistema planificador para la simulación de los tratamientos radioterápicos.

miento. Por otra parte, se han utilizado también en los experimentos, maniqués de diversos tamaños (adulto, adolescente y niño) y materiales (figura 4), incluyendo uno de tejido equivalente, basado en tejido animal (cerdo fresco) (figura 5), para observar las posibles dependencias con estas variables<sup>[15]</sup>.

### Análisis de riesgo: Nuevos modelos de dosis y repercusión clínica

Cuando se decide tratar la patología cancerígena de un paciente con radioterapia, se le realizan diversas pruebas de imagen (radiografías, TC, RMN, PET), con el objetivo de localizar y conocer exactamente la geometría de dicho tumor y planificar el tratamiento con radiaciones. Esto se lleva a cabo en los denominados “planificadores”, que permiten simular cuánta dosis de radiación llegará al tumor para destruirlo y cuánta, de forma no deseada, recibirán los órganos adyacentes (figura 6). Esta última debe ser considerada para no sobrepasar ciertos límites y evitar provocar efectos secundarios con el tratamiento. Es habitual diseñar varias estrategias para, con el mejor criterio clínico, elegir cuál de las planificaciones parece más adecuada. Es decir, seleccionar aquella que garantice el éxito y reduzca las complicaciones al mínimo.

En este contexto, como ya se ha dicho, existe también una pequeña dosis periférica, fuera de la zona de estudio y que alcanza todo el cuerpo. Una parte importante de esta contribución es la contaminación de neutrones, como consecuencia del tratamiento habitual de fotones, que como ya se ha mencionado, que resulta muy difícil de considerar por la complejidad de su medición. Por ello, hasta ahora este aspecto no se está evaluando, y consideramos que debería ponerse también sobre la mesa para la selección del mejor tratamiento que se va a aplicar. Nuestro nuevo detector viene a cubrir este hueco, que sin duda contribuirá a que los tratamientos sean más adecuados y, por tanto, se pueda reducir en buena medida el número de segundos cánceres que están apareciendo como consecuencia de los tratamientos. Realmente el riesgo es bajo, pero unido a la enorme población que se beneficia de la radioterapia y a la creciente expectativa de vida de los pacientes tratados, su impacto se vuelve apreciable.

La optimización y/o evaluación de los tratamientos en los planificadores se hace habitualmente desde un punto de vista físico; es decir, considerando solo la distribución de la dosis de radiación depositada en los tejidos. No obstante, es cada vez más frecuente la utilización de parámetros radiobiológicos. Este análisis se

realiza, para cada paciente, en base a funciones físico-biológicas que tienen en cuenta la probabilidad de control tumoral y de toxicidad de los órganos sanos circundantes al tumor<sup>[16]</sup>. El desarrollo de estas funciones radiobiológicas vino de la mano de la aparición de las planificaciones 3D, que generan una matriz volumétrica de distribución de dosis de radiación en el tumor y órganos de riesgo. Dicho conocimiento permitió, en primer lugar, evaluar de forma cuantitativa la respuesta a dosis de los órganos para elaborar modelos más precisos y, en segundo lugar, la parametrización de dichos modelos, de forma que puedan generar predicciones acertadas. En la actualidad, dichas funciones están incluidas en varios de los programas de planificación comerciales existentes, lo que permite un uso más extendido de estas funciones. Su impacto clínico ha sido fundamental para sacar provecho a la tecnología existente en radioterapia, y para generar tratamientos que incorporan no solo la física del problema sino también la biología del paciente.

Sin embargo, la dosis de radiación no se mantiene, desafortunadamente, confinada al volumen bajo el haz. Por tanto una vez que esta pueda ser determinada, estaríamos en condiciones de incluir el riesgo de cáncer secundario en el análisis radiobiológico de los tratamientos.

En la actualidad, no existen modelos que involucren un análisis más global, como el riesgo de inducción de un segundo cáncer. Fundamentalmente porque, hasta ahora, no era posible, especialmente para el caso de los neutrones, disponer de información parametrizada de la distribución de dosis en todo el volumen del paciente.

El proyecto de nuestro grupo, financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear, abordó de forma exitosa la estimación de dosis neutrónica en pacientes sometidos a radioterapia (figura 7). No sólo estamos ahora en condiciones de poder estimar durante la irradiación la dosis equivalente de neutrones en distintos órganos de un paciente tratado con un haz de fotones de alta energía<sup>[9]</sup> sino que, incluso podemos estimarlas a partir de los modelos que se han derivado tras la aplicación de dicha metodología a un grupo de más de 1.300 pacientes<sup>[10]</sup>. Esto, no obstante queda restringido a solo dos tipos estándar de tratamiento; a saber, en la zona de la cabeza o del abdomen. En la actualidad estamos trabajando en este frente, con algunos resultados muy prometedores. Con los detectores de última generación que estamos poniendo a punto en la clínica, se podrá, de forma operativa, conocer dichas dosis periféricas en maniqués antropomórficos. Esto conducirá al siguiente paso, que sería el desarrollo de los

modelos físicos que permitan emplear esta información en la evaluación y optimización de cualquiera de los tratamientos o técnicas reales existentes en la clínica. En este sentido, una nueva variable radiobiológica denominada SCP (*Second Cancer Probability*) ha sido introducida por nuestro grupo y puesta a punto en una patología particular, como es el cáncer de próstata. Usando este nuevo parámetro, la toma de decisión para elegir la mejor estrategia de tratamiento a seguir, se hace más completa. El estudio final, obviamente requeriría de la información de ambas componentes: la fotónica<sup>[16]</sup> y la neutrónica.

### Nuevos detectores para la medida en el interior de maniqués

A pesar de los buenos resultados obtenidos con el sistema existente, su uso generalizado ha encontrado varias dificultades importantes, entre ellas, el uso de componentes comerciales obsoletos. Aunque estos son los adecuados para su uso como detector neutrónico, ya que contienen  $^{10}\text{B}$  (lo que genera problemas en el sector aeroespacial, debido a la radiación cósmica, o la industria nuclear, por ser fuente de errores en el instrumental electrónico), permite una disponibilidad muy limitada de unidades a precios variables y producidos en diferentes fábricas. Actualmente es difícil lograr comprar estos

componentes en los mercados internacionales y, además, las diferentes producciones dan lugar a variaciones importantes de sensibilidad entre componentes que corresponden funcionalmente incluso al mismo lote de fabricación.

Una posible solución a este problema sería afrontar los altos costes de diseño específico de componentes dedicados y su posterior producción. Para ello, se han llevado acciones, lideradas por el grupo de Física de Radiaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, contando con otros expertos internacionales, lo que nos permitirá la obtención de ayudas en el marco de proyectos financiados por la Unión Europea.

No obstante, la metodología desarrollada es igualmente válida para cualquier otro tipo de dispositivo que vaya apareciendo. Este es el caso del detector TNRD (figura 8), desarrollado por el Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) de Frascati y el Politécnico de Milán, que en el marco del proyecto NESCOFI@BTF ([www.lnf.infn.it/acceleratori/public/nescofi/](http://www.lnf.infn.it/acceleratori/public/nescofi/)) han puesto a punto y caracterizado un nuevo tipo de detector activo miniaturizado para neutrones térmicos, capaz de medir correctamente desde flujos muy bajos ( $10\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ) hasta flujos muy altos ( $10^6 - 10^7\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ) en presencia de un intenso fondo de fotones. Estas características permitirían el traslado a la clínica, no solo para la caracterización de



Figura 7. Montaje para el proceso de medidas de pacientes: (a) sala de tratamiento con ubicación del detector señalada y (b) sala de control.

Figura 8. Nuevo detector de neutrones térmicos TNRD. El detector miniaturizado, se encuentra ubicado sobre su equipo electrónico asociado.



Figura 9. Maniquí antropomórfico con el detalle de la ubicación de ambos detectores SRAM (marcado en rojo, junto al muro frente al acelerador) y TNRD (en el interior del maniquí).



las salas y medidas de pacientes, como el ya desarrollado, sino para su uso en el interior de maniqués antropomórficos, lo que supondría obtener en tiempo real la estimación de la dosis en órganos (figura 9). Teniendo en cuenta que estas medidas, hasta ahora, solo se han podido hacer con detectores pasivos (TLD, láminas activables, plásticos), que siempre necesitan de un complicado posprocesamiento, se puede afirmar que el potencial de innovación de este detector, en el campo de las verificaciones neutrónicas para uso médico, sería muy significativo. El beneficio más importante sería el de poder evaluar cualquier nueva técnica, para su posterior modelización y valoración de pacientes con el detector en la sala de tratamiento. Además, la espectrometría podría llevarse a cabo de una forma sencilla y operativa, propia de un entorno médico, ya que una sola esfera con un con-

junto de estos pequeños detectores en su interior, podrían suministrarnos en tiempo real los resultados.

## Conclusiones

Se ha abordado por primera vez y de forma global (desde la física básica de la detección neutrónica a su aplicación clínica) un importante problema que afecta a los pacientes tratados de cáncer con la radioterapia moderna: la aparición de segundos cánceres como efecto colateral del tratamiento, en particular debido a la contaminación neutrónica. Por fin, avalados por la comunidad científica, sabemos qué está pasando y conocemos cómo establecer los mecanismos para evitarlo o reducirlo. Pensamos que es pues el momento oportuno para trasladar estos conocimientos desde el campo de la ciencia a la clínica y desarrollar dispositivos más operativos, de cara al establecimiento de normativas que permitan el control

de la dosis periférica e incluyan de forma particular la componente neutrónica.

## Autores y colaboradores

Los resultados obtenidos no hubieran sido posibles sin la ayuda de grupos de expertos de las diferentes áreas que requiere un trabajo tan interdisciplinar como el aquí presentado. Agradecemos la colaboración de sus líderes: Carles Domingo, Francisco Fernández y Maite Romero, de la Universidad Autónoma de Barcelona; Faustino Gómez, de la Universidad de Santiago de Compostela; Juan Ignacio Lagares, Jesús Marín y José María Gómez Ros, del Ciemat; Raquel Barquero, del Hospital Universitario Río Hortega de Valladolid; Roberto Bedogni, del INFN de Frascati (Italia); Andrea Pola y Michele Lorenzoli, del Politécnico de Milán (Italia); Beatriz Sánchez-Nieto, de la Universidad Católica de Chile; José Antonio Terrón, del Hospital Universitario Virgen Macarena de Sevilla; Francisco Sánchez Doblado y Leticia Irazola de la Universidad de Sevilla (FIUS); y a los más de 30 hospitales donde se han realizado los experimentos y medidas de pacientes.

## Referencias bibliográficas

- [1] Phys Med Biol 2008;53:R193-R241.
- [2] Cancer 2005;104:1129-1137.
- [3] CA 2013;63:11-30.
- [4] J Radiat Oncol Biol Phys 2006;65:1-7.
- [5] Lancet Oncol. 2011;12:353-360.
- [6] ICRP Publication 103 2007.
- [7] Radiother Oncology 2007;84:S255.
- [8] Phys Med Biol 2010;55:1025-1039.
- [9] Phys Med Biol 2012;57:6167-6191.
- [10] Radiother Oncology 2013;107:234-241.
- [11] IFMBE Berlin:Springer 2012;39:1245-1248.
- [12] Int J Radiat Oncol Biol Phys 2005;62:1204-1216.
- [13] IEEE TNS 2013;60(6):4692.
- [14] RADECS 2011;25:922-925
- [15] IFMBE Berlin:Springer 2012;39:1145-1148.
- [16] Med Phys 2012;39(6):3812.

Ramón Núñez Centella (La Coruña, 1946) se licenció en Ciencias por la Universidad de Santiago de Compostela, trabajó en la industria y se dedicó durante muchos años a la enseñanza en la escuela secundaria. Entre 1976 y 1977 realizó un máster en Didáctica de la Ciencia en la Universidad de Nueva York, que marcaría su trayectoria posterior. En 1983 fue nombrado director del Servicio Municipal de Educación del Ayuntamiento de La Coruña, desde donde propuso y diseñó la Casa de las Ciencias (1985), el primer museo interactivo público de ciencia español. Posteriormente puso en marcha Domus (1995) y Aquarium Finisterrae (1999). Los tres centros forman los Museos Científicos Coruñeses, que dirigió desde su creación hasta su nombramiento como director del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (Muncyt),

en 2008. Ha participado, además, en el desarrollo de otros proyectos, como el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe de Valencia y el Museo de la Evolución Humana de Burgos, entre otros. Ha dirigido decenas de exposiciones y programas de planetario, escrito cientos de artículos de divulgación en diversos medios y dirigido varios programas de ciencia en radio y televisión, además de ser autor de ocho libros. Por su trayectoria está reconocido como el pionero y principal impulsor de los centros interactivos de ciencia en España. En diciembre de 2013 ha dejado la dirección de Muncyt, por jubilación, tras conseguir dotar al museo de su primera sede emblemática, tras un cuarto de siglo de existencia, abierta al público en La Coruña en mayo de 2012, además de sentar las bases para la sede futura del museo en Alcobendas (Madrid).

Entrevista a Ramón Núñez Centella, exdirector del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología

## “La educación científica en la escuela sigue siendo la gran asignatura pendiente”

■ Ignacio Fernández Bayo, periodista científico, director de Divulga ■

Hijo, nieto y bisnieto de maestros, Ramón Núñez, más conocido como Moncho, lleva en la sangre la preocupación por la educación en España, singularmente la científica. Tras desengañarse de la educación formal, buscó fórmulas alternativas para extender la cultura científica al público general y encontró un filón en los museos interactivos de ciencia, a cuyo impulso, desarrollo y diseño ha dedicado más de

tres decenios. Para hablar de toda esa trayectoria le visitamos en la pequeña y provisional sede madrileña del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología la víspera de su jubilación como director del mismo.

**PREGUNTA:** *¿Qué supone la jubilación para usted?*

**RESPUESTA:** Podría decir que da un poco de vértigo. Esto es un cambio de paradigma porque hasta ahora, desde

que recuerdo, siempre estuve marcado por las obligaciones. A cada época de vacaciones, seguía la de las obligaciones. Ahora llega la vacación sin horizonte, ilimitada. También ha sido todo una sucesión de metas volantes, de objetivos que se sucedían: que apruebes la primaria, el bachiller, la carrera, la oposición, la plaza, conseguir un museo, otro...

**P:** *¿Ni una pizca de amargura?*

**R:** No, qué va.

**P:** Seguro que ha dejado metas sin cumplir.

**R:** A estas alturas no. De las asignaturas que supe que no podía aprobar decidí no matricularme. Desde el punto de vista profesional es tan satisfactorio lo alcanzado que no me puedo permitir el lujo de un amargor. Tengo que estar muy contento porque La Coruña tenga los museos científicos que tiene, porque el Museo Nacional haya dado el salto que ha dado en los últimos seis años... la profesión de divulgador científico es muy satisfactoria.

**P:** ¿Hay cosas que quería cambiar y no han cambiado?

**R:** Sí, la más importante, la educación científica en la escuela, que sigue siendo la gran asignatura pendiente. Los discursos de aprendizaje activo de las ciencias que echábamos hace 40 años se podrían volver a repetir porque hemos avanzado muy poco... La educación científica debería empezar desde que los niños son muy pequeños. Igual que se les enseña a pintar, aún sabiendo que sus cuadros nunca van a ir a un museo, pues igual deberían enseñarles a hacer ciencia, aunque no vayan a ser científicos.

**P:** ¿Y cómo se hace eso?

**R:** Lo importante son las habilidades y las actitudes. Al hablar de formación científica no pienso en los datos que puedan llegar a saber ni en que me repitan el principio de Arquímedes, se trata de que tengan curiosidad, creatividad, espíritu crítico, constancia y que aprendan a observar, distinguir, ordenar, clasificar, describir, medir, definir, formular hipótesis, identificar variables, diseñar modelos... Eso es hacer ciencia, y no enseñarles listas de cosas que deben memorizar.

**P:** En la puerta del museo todos los mensajes son en torno a la duda. ¿Es la duda el motor de la ciencia?

**R:** Sí, la verdad es que están relacionados con el logotipo del museo, que es un signo de interrogación que da vueltas en torno al punto. Es el motor de la

ciencia, sugiere una turbina, y la turbina que mueve la ciencia es esa: es darle muchas vueltas a las preguntas. Cuando hicimos la presentación del museo quise centrarme en esa idea, en el valor de la duda, de la pregunta. Hay una frase de Einstein que está en la bajada hacia el museo que pone “lo importante es no cesar de preguntarse cosas” la curiosidad es el germen de la ciencia.

**P:** ¿Perdemos la capacidad de hacer nuevas preguntas con la edad?

**R:** El niño llega a la escuela con la capacidad de hacer preguntas, pero allí esa capacidad se le castra. El niño va con las preguntas libres, por ejemplo, ¿por qué los perros levantan la pata para orinar? Pero en la escuela le dicen que

*Los museos interactivos contribuyen a quitar ese velo de misterio, desconocimiento y desconfianza que suscita la ciencia*

esa pregunta no es importante, incluso que no es pertinente, que lo que tiene que preguntarse es cuáles son los ríos más importantes de España, cuáles son los científicos más importantes de la historia o cuál es el enunciado del principio de Arquímedes. Luego le van diciendo todas las preguntas para las cuales tienes que tener una respuesta, y a eso se llaman programas oficiales. En muchos casos los niños deciden que ya no preguntan más.

**P:** ¿Se metió en museística como otra forma de educar?

**R:** De alguna manera, porque yo tenía un cierto desengaño hacia la enseñanza reglada, que tiene excesivo hermetismo,

está todo demasiado fijado y definido, con los programas enunciados y dirigidos a lo memorístico. Los museos son posibles agentes del sistema que contribuyen a la educación continua de forma lúdica, tanto de niños como de adultos, porque el derecho a la educación no caduca, sigues teniéndolo toda la vida.

**P:** ¿Qué papel cumplen los museos interactivos?

**R:** Es múltiple. Sirven de apoyo en la labor educativa, mediante un componente motivador, al aportar espectacularidad y vincular la ciencia con algo festivo, permitiendo, además, experiencias difíciles de realizar en clase. Ayudan también a romper las barreras disciplinares, porque la educación formal está muy compartimentada. Socialmente lo más importante es contribuir a cambiar la actitud de la población hacia la ciencia, quitarle ese velo de misterio, desconocimiento, desconfianza... y convertir la ciencia y a los científicos en algo más próximo. En el aspecto cognoscitivo, la gente conoce más cosas de la ciencia gracias a los museos, aprende hechos, leyes, teorías, y también procesos, procedimientos y cómo llegan unos científicos a una conclusión.

**P:** ¿Cree que la proliferación de estos centros va a continuar o nos encontramos cerca de la saturación?

**R:** No lo sé, pienso que todavía no hay saturación. Cuando se desarrollaron los museos provinciales de bellas artes, se aspiraba a que hubiese uno en cada provincia y no se veía como una saturación. No sé si estos centros tienen capacidad de desarrollo provincial, pero no veo problema en que en España acabe habiendo 50 centros de ciencia. Hay todavía mucho espacio para crecer.

**P:** Pero ¿no resultan excesivamente redundantes?

**R:** El reto es que cada uno tenga un discurso expositivo diferente. Una posibilidad atractiva puede ser la especialización,



## El legado de Arturo Duperier

“De todo lo que tiene el museo relacionado con la física de partículas, lo más importante es la colección de aparatos de Duperier para medir la radiación cósmica, y el acelerador de partículas del Ciemat, que se muestra en la sede de La Coruña y que fue el primer acelerador de partículas que se montó en España”, dice Ramón Núñez. El físico español Arturo Duperier (Ávila, 1896) fue uno de los científicos integrantes de la llamada Edad de Plata de la cultura española o Generación del 27. Introdutor en España de la teoría de la relatividad, logró la cátedra de Geofísica en la Universidad de Madrid, pero en 1938 se exilió a Gran Bretaña, donde trabajó en el Imperial College con el premio Nobel, Patrick Blackett, en el estu-

dio de la radiación cósmica. Regresó a España en 1953 y el Imperial College le cedió su equipo experimental para que siguiera investigando. Sin embargo, problemas aduaneros retuvieron los aparatos hasta 1958, tres años antes de su fallecimiento.

Además de los aparatos de Duperier, “la exposición dedicada al siglo XX tiene un contador Geyger y alguna cámara de niebla. No hay nada directamente relacionado con la energía nuclear, porque es muy difícil, ya que todos los aparatos significativos que proceden de una central nuclear están más o menos contaminados. En algún momento pensé en exponer un elemento combustible, pero tendría que ser una réplica y no es fácil conseguirlo”, añade Núñez. ▶

que Tenerife hable del cosmos, Murcia del agua, Domus del hombre, Burgos de la evolución... La especialización te permite que aunque estos centros tengan un territorio asiduo, de tipo regional, mantengan un territorio turístico más amplio.

**P:** ¿Su futuro pasa entonces por la especialización?

**R:** Yo diría que sí, una vez que hay unos cuantos museos básicos. Lo que no puede ser es que te encuentres otra vez los módulos del Exploratorium en todos los museos a los que vas. Este es el camino que abrió Domus al ser monográfico.

**P:** Usted ha dedicado a este tipo de museos de ciencia 30 años.

**R:** Exacto. En diciembre de 1983 el Ayuntamiento de La Coruña aprobó la creación de la Casa de las Ciencias.

**P:** ¿Ha cambiado la cultura científica en este país en esos años?

**R:** En Galicia ha cambiado radicalmente la imagen de la ciencia entre la población. Piensa que antes, la única relación que tenía un ciudadano con la ciencia era la enseñanza que hubiera recibido en las asignaturas de ciencias en la escuela; en muchos casos de recuerdo desagradable, porque la matemática era



la más difícil, la física estaba llena de problemas sin sentido y la química era aprender unas cosas llamadas valencias que servían para formular; por ejemplo la fórmula del hipofosfito cálcico, algo que no habías visto nunca ni lo ibas a ver, pero eras capaz de escribir la fórmula. ¿Eso sirve para algo? Creo que en general ha habido un cambio importante.

**P:** ¿Se puede medir la cultura científica?

**R:** Yo creo que sí, pero no con los baremos que se usan muchas veces: esas encuestas en las que preguntan a la gente si la Tie-

rra gira alrededor del Sol o viceversa, si coincidieron dinosaurios y humanos, cuántos científicos conoce... Preguntas que miden algo de tus conocimientos científicos, pero la cultura científica es otra cosa; debería medir la actitud científica de una persona, su espíritu crítico, su curiosidad, su creatividad, su capacidad para hacerse preguntas y para hallar respuestas. Hay que diseñar un sistema para medir la cultura científica, pero no es difícil. Un indicador podría ser un fenómeno que incluí en 1983 en el proyecto para la Casa de las Ciencias: cuando me encontré un infor-

me de la Asociación de Centros de Ciencia y Tecnología que decía que en el año anterior, en Estados Unidos, hubo más visitantes a museos de ciencia que a todos los partidos de baloncesto, fútbol americano y beisbol; los tres deportes más populares de Estados Unidos, juntos. Y eso, es un indicador de la cultura científica de un país. Yo entonces me dije, “quiero que esto pase en mi país”.

**P:** ¿Y ha pasado?

**R:** Sí. Y eso, en estos 30 años, ha pasado. En La Coruña va más gente a los

los complejos de inferioridad, con un edificio de un arquitecto de renombre internacional, Arata Isozaki, como se hacía con los grandes museos de arte y los palacios de la ópera. Su contenido era un guiño a la inteligencia de las personas, con lecturas divergentes, interdisciplinares y claves pictóricas, estéticas, poéticas, históricas, literarias... Y el acuario es un homenaje al mar. Nace en la única ciudad del mundo donde habían tenido lugar dos, que luego fueron tres, grandes desastres por vertidos de petróleo, el *Urquiola* y el *Mar*



museos científicos que al fútbol, y en Valencia, en Granada, en Pamplona, en Cuenca... aunque en Madrid todavía no.

**P:** Usted ha creado cuatro museos. De forma sintética, ¿qué supuso cada uno de ellos para usted?

**R:** La Casa de las Ciencias es el primogénito, y el principal logro fue conseguir que, por primera vez en España, un ayuntamiento dedicara parte de su presupuesto de cultura a la divulgación científica. Hasta entonces te podías atrever a decir que la ciencia era cultura pero entonces se hizo realidad. Domus significó romper

*Egeo* (y más tarde el *Prestige*). Queríamos que fuera un acuario mezclado con el mar; donde el mar entrara en el acuario y el acuario entrara en el mar. Tenía que tener una naturaleza profundamente ecológica, y era y es el único acuario de España donde el escenario está realmente vivo. Las algas, los crustáceos, las estrellas de mar, las anémonas..., toda la vida que se ve es auténtica. El reto fue hacerlo de forma viable, porque el mantenimiento tiene problemas muy serios. Simboliza el respeto a la naturaleza.

**P:** ¿Y el Muncyt?

**R:** Desde la perspectiva coruñesa se trató completar un conjunto de museos científicos con un matiz esencial que es el de la colección. El Muncyt dispone de 17.000 piezas, mientras que los demás nacieron como museos interactivos, sin una colección de objetos. En segundo lugar, tiene una temática propia que no había afrontado previamente, que es la tecnología en un mundo que depende tanto de ella. Y luego hay matices derivados de su condición de museo nacional, una etiqueta que significa que es patrimonio del pueblo español. También supone obligaciones por su carácter patrimonial, que debe salvaguardar cosas para futuras generaciones, muestra del respeto que debe tener nuestro patrimonio tecnológico. Además, el Muncyt asume el objetivo de ser el escaparate de la ciencia española, es decir que queremos enseñarle a la gente qué están haciendo nuestros científicos e inventores y qué hicieron a lo largo de la historia.

**P:** ¿Ha sido un reto mezclar un museo objetual con uno conceptual que es su especialidad?

**R:** A estas alturas ya no. Todo me parecía fácil, tanto como que un día se me ocurrió meter un Jumbo y me pareció la cosa más natural del mundo. Y recuerdo cuando fuimos a por el bicho y dije: “hasta allí, cortamos por aquella ventana, de aquí para allá me lo llevo”. Luego hubo que ver cómo lo cortamos, lo traemos, lo montamos, pero ahí está.

**P:** Usted tenía la idea de llevar el museo más allá de Madrid y de La Coruña...

**R:** Eso sigue en pie. El museo quiere tener muchas sedes, un museo nacional tiene que hacer honor a su apellido y eso significa estar lo más próximo que pueda a todo el país. Las épocas en las que había que concentrar todo el patrimonio en la capital han pasado, sobre todo en ciencia y tecnología, donde el patrimonio en sí está disperso y los centros de investigación están repartidos. ©

# Radiografía

## Piscinas de almacenamiento de combustible gastado

■ Texto: **Carmen Muñoz Muñoz** | Área de Ingeniería de Sistemas del CSN ■

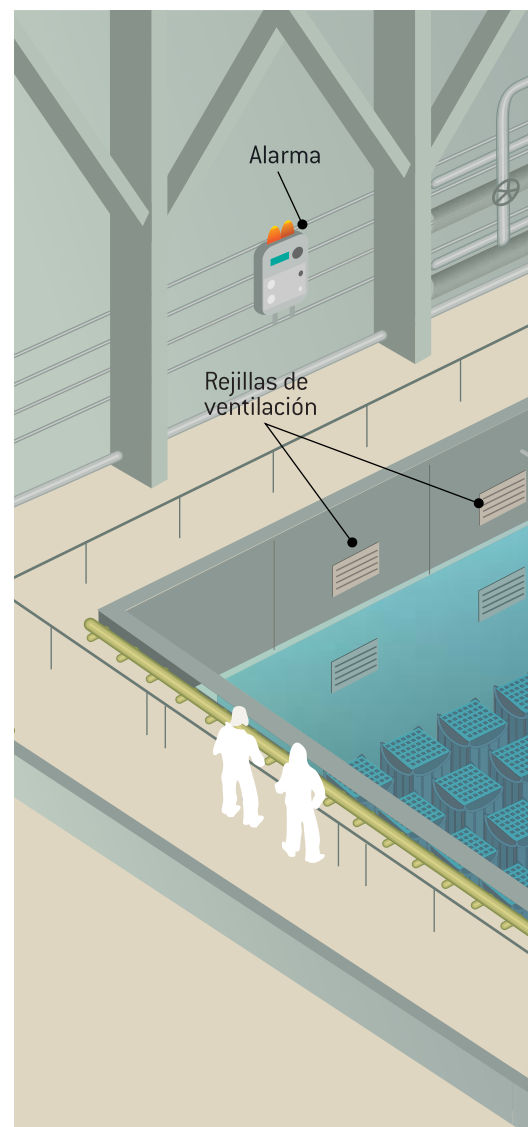
Una vez transcurrida la vida útil del combustible nuclear ha de ser almacenado en instalaciones que permitan eliminar el calor residual, disminuir la radiación por debajo de los límites establecidos y evitar el inicio de la reacción en cadena (criticidad). El almacenamiento bajo agua cumple estos tres objetivos: el fluido refrigera los elementos combustibles por circulación forzada; el agua proporciona un blindaje radiológico para el personal y el mantenimiento de una distancia adecuada entre los elementos combustibles, así como la utilización de boro en algunas piscinas, evita la criticidad del conjunto.

Las piscinas de almacenamiento de combustible gastado (PCG) están construidas de hormigón armado con un revestimiento de acero para prevenir fugas y mantener la calidad del agua. Junto con los sistemas de refrigeración asociados, están diseñadas para soportar sismos. En los reactores de agua en ebullición (BWR), está generalmente situada dentro del edificio del reactor. En los de agua a presión (PWR) se localiza fuera de la contención pero adyacente a la misma, salvo en la central de Trillo, cuya piscina está situada dentro de la contención. El agua utilizada para rellenar la piscina y reponer las pérdidas por evaporación o por fugas es de alta pureza y existen métodos alternativos de aporte en el caso de que la fuente preferente no esté disponible.

Normalmente, las PCG miden 12 metros de profundidad y varían en anchura y longitud. El combustible se almacena en

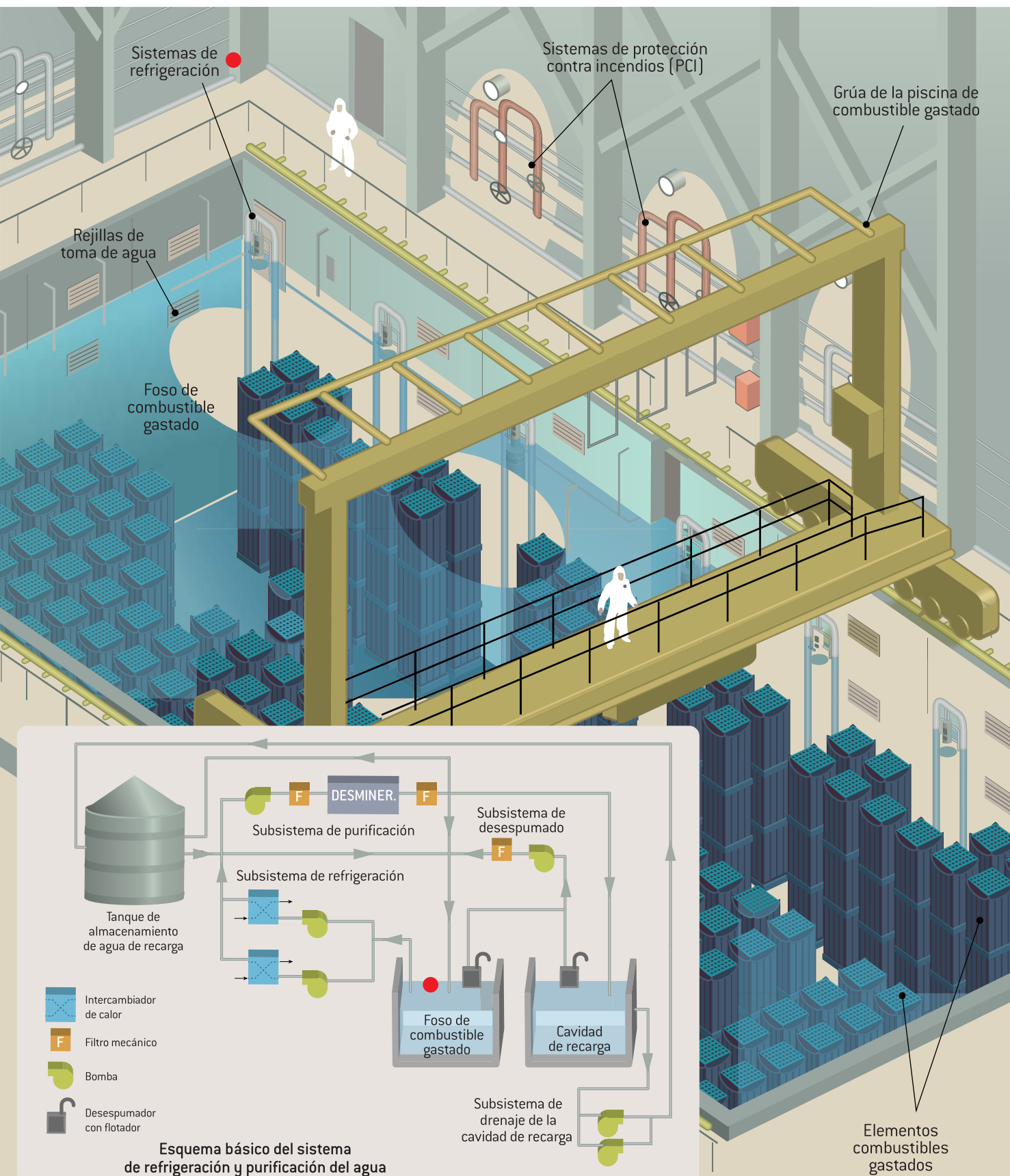
bastidores de acero inoxidable con aproximadamente 7 metros de agua sobre la parte superior de los elementos combustibles. El agua en los BWR está desmineralizada mientras que los PWR utilizan agua borada. Su capacidad varía entre los 805 elementos combustibles de Trillo y los más de 5.000 de Cofrentes, distribuidos en dos piscinas. Además, debe disponer de espacio suficiente para almacenar el núcleo completo de la vasija del reactor en caso necesario.

La PCG está refrigerada por un sistema de dedicación exclusiva para este propósito. El refrigerante es impulsado por bombas centrífugas a través de cambiadores de calor, donde el calor es transferido a un sistema intermedio, refrigerado por el sumidero final de calor de la planta. El sistema de refrigeración aspira el agua de la piscina a través de un rebosadero o de rejillas a una elevación tal que una variación en el nivel produciría la pérdida de succión de las bombas, lo que a su vez previene de la pérdida de inventario de la piscina a través de una posible rotura en las tuberías del sistema. Las líneas de retorno descargan cerca de la parte superior de los elementos combustibles o están dispuestas de tal forma que el caudal refrigerante se distribuya alrededor del fondo. Cuando las tuberías se introducen hasta el fondo de la piscina, deben ir equipadas con dispositivos que impidan el vaciado por efecto sifón y el drenaje de la piscina por fallos en los alineamientos del sistema o por rotura de tuberías. Todos estos sistemas son redundantes.



Cada planta está provista de un sistema de purificación y limpieza del agua, que normalmente está conectado con el sistema de refrigeración y que consta de filtros, intercambiadores de iones y otro equipo soporte.

Todas las centrales cuentan con instrumentación para vigilar el funcionamiento de la piscina. Además de la instrumentación local, los parámetros monitorizados incluyen nivel y temperatura, fugas del revestimiento metálico, presión de descarga y caudal de las bombas del sistema de refrigeración de la piscina. Habitualmente, la mayor parte de la instrumentación se encuentra en un panel local y solo los parámetros importantes (nivel y temperatura) son vigilados en la sala de control.



# Reacción en cadena

## NOTICIAS

### El genoma de un vallisoletano de hace 7.000 años muestra que era de piel oscura y ojos azules

El genoma de un cazador y recolector que vivía en tierras de Castilla hace 7.000 años ha podido ser descifrado y el resultado muestra a un individuo de piel oscura y ojos azules, una combinación de rasgos que desapareció hace tiempo de Europa. Se trata del genoma humano más antiguo del mundo que ha podido ser analizado. La proeza la ha llevado a cabo un grupo de investigación español del Instituto de Biología Evolutiva (centro mixto del CSIC y la Universidad Pompeu Fabra), en colaboración con el Centre for GeoGenetics de Dinamarca, y los resultados se han publicado en la revista *Nature*.

Los restos de este antepasado fueron encontrados en el yacimiento de La Braña-Arientero, en la provincia de Valladolid, y según el investigador Carles Lalueza-Fox, "fue una sorpresa descubrir que este individuo poseía las versiones africanas en los genes que conforman la pigmentación clara de los europeos actuales, lo que indica que tenía la piel oscura, aunque no podemos saber el tono exacto. Más

sorprendente aún fue descubrir que poseía las variantes genéticas que producen los ojos azules en los europeos actuales, lo que resulta en un fenotipo único en un genoma que, por otra parte, es inequívocamente norte europeo".

El prehistórico habitante, al que se ha denominado La Braña-1, vivió en el Mesolítico, una etapa de transición del Paleolítico al Neolítico, que se inició hace unos 10.000



Retrato que los investigadores han hecho a partir de su genoma.

años, se prolongó durante cinco milenios y finalizó con la llegada de la agricultura y la ganadería para dar paso al Neolítico, época en la que los cazadores sufrieron diversas adaptaciones genéticas. Una de ellas es, por ejemplo, la capacidad para digerir lactosa que no poseía La Braña, principal protagonista de esta investigación que ha proporcionado el genoma más antiguo conocido.

### Hallado el documento matemático más antiguo de China

Una reliquia que la historia se encargó de esconder durante 22 siglos ha regresado a la luz ahora. Un grupo de historiadores ha descubierto en las provincias centrales de Henan y Hubei, el documento matemático considerado más antiguo conocido de

China. La pieza, que tiene más de 2.200 años de antigüedad, consiste en unas inscripciones en tablillas de bambú, soporte de escritura muy común en China antes de que se inventara el papel y que se guardaba en rollos, en las que se explican métodos de multiplicación de números menores a 100 y también fracciones.

Según ha explicado Guo Shuchun, director de la Sociedad China para la Historia Matemática, se trata del único documento que se ha hallado sobre ciencias exactas anterior a la primera dinastía histórica china, La Qin, (221-206 a. C.). Las tablillas forman parte de una colección de 2.500 tablas de bambú con textos oficiales y obras clásicas grabadas en sus tejidos, que adquirió la Universidad de Tsinghua después de haber sido ilegalmente sacadas del país.

Los expertos han declarado que los conocimientos matemáticos que revela el documento son muy avanzados para su tiempo y que la obra es un gran descubrimiento para la historia matemática china y mundial.



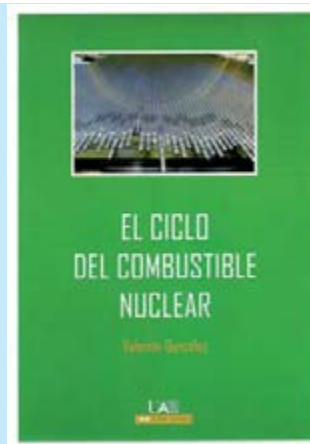
## LIBROS

**El ciclo del combustible nuclear****Valentín González****UAM Ediciones. Madrid, 2013**

Una de las claves de la energía nuclear es el ciclo del combustible, que se inicia con la extracción minera del uranio, pasa por el complejo proceso de su conversión en pastillas de óxido de uranio insertadas en las varillas que forman los elementos combustibles, se utiliza en los reactores y se almacena en las piscinas de combustible gastado, y termina en diferentes destinos, según se reutilice o no. En España, su destino es estar bajo vigilancia en el almacén temporal centralizado que está en marcha, con la posibilidad de que se someta a procesos de separación y transmutación o termine definitivamente enterrado en un almacén geológico

profundo. Todos estos procesos y opciones son descritos de forma divulgativa y accesible en este libro, profusamente ilustrado y pensado para el lector interesado pero no especializado. Su autor habla con conocimiento de causa, ya que formó parte del equipo fundador de Enresa, la empresa que gestiona los residuos radiactivos en España.

Doctor en Química y periodista, Valentín González trabajó tanto en el área técnica como en la de la comunicación, que dirigió durante muchos años.

**Un frigorífico que no necesita frío**

La creación de un frigorífico capaz de seguir manteniendo su función y operar a temperatura ambiente es el objetivo que persigue un grupo de científicos del Laboratorio Nacional de Física de Reino Unido (NPL) y del Imperial

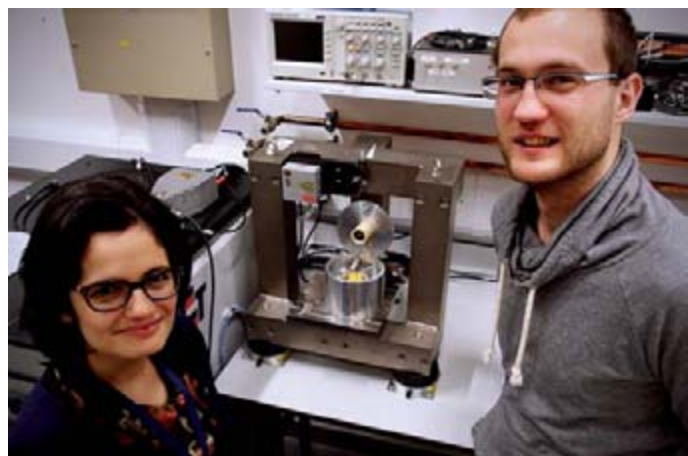
material cambia de temperatura bajo un campo eléctrico aplicado.

Los refrigeradores actuales están basados en ciclos continuos de compresión y expansión de gases, como por ejemplo, el freón, que al

Un refrigerador electrocalórico requiere menos energía, por lo que resulta más eficiente, y no libera gases nocivos. El enfriamiento electrocalórico aprovecha la capacidad de algunos materiales para cambiar adiabáticamente su temperatura, es decir, sin intercambiar calor con su entorno,

cuando se aplica o se elimina un campo eléctrico.

“Creemos que en pocos años será posible desarrollar un refrigerador así, viable, y estamos abiertos a las propuestas de aquellas empresas que quieran trabajar con nosotros y estudiar las diferentes aplicaciones” dice Correia.



College. El proyecto, dirigido por Tatiana Correia, busca desarrollar nuevas técnicas de refrigeración basadas en el efecto electrocalórico, un fenómeno por el que un

enfriarse se condensa en un líquido, que absorbe el calor de la zona de refrigeración y se evapora. Este tipo de productos puede ser perjudicial para la salud y el medio ambiente.

**EFEMÉRIDES ► HACE 100 AÑOS...****La tabla periódica se ordena según el número atómico**

El físico británico Henry Moseley, al estudiar la emisión de rayos X por los elementos químicos descubrió que su frecuencia variaba según la carga positiva de sus núcleos, lo que le permitió ordenar los elementos de la tabla periódica no por sus masas sino por su carga positiva. Nació así el concepto de número atómico, que

llevó a cambiar el orden de algunos elementos y a determinar con precisión los elementos que aún faltaban por descubrir. Moseley murió al año siguiente en un combate de la I Guerra Mundial.



## AGENDA

### Ciclo de conferencias

#### **"Los secretos de las partículas. La física fundamental en la vida cotidiana"**

Del 16 de enero al 17 de noviembre de 2014.

**Fundación BBVA. Palacio del  
Marqués de Salamanca**  
Paseo de Recoletos, 10. Madrid

La física actual explica la constitución más elemental de la materia y de las fuerzas que la gobiernan mediante un sistema ampliamente aceptado, denominado modelo estándar, formado por el conjunto de partículas consideradas elementales. A este modelo le faltaba para completarse la comprobación de la existencia de una de esas partículas, el bosón de Higgs, que finalmente se dio por demostrada en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN), en julio de 2012. Este ciclo de divulgación, formado por nueve conferencias, intenta acercar al público general el complejo mundo de las partículas elementales y los medios de que disponen los científicos para estudiarlas. El ciclo es fruto de la

colaboración entre la Fundación BBVA y el CERN, y en él participan prestigiosos científicos, incluido el actual director general de esta institución, fruto de la cooperación científica europea. ▶

### Exposición

#### **"TecnoRevolución: la era de las tecnologías convergentes"**

Hasta el 11 de mayo de 2014

**Espacio Fundación Telefónica**  
C/Fuencarral, 3. Madrid

La aceleración con la que los cambios tecnológicos se incorporan a la vida cotidiana es cada vez mayor. Una de las razones es, según esta exposición, la confluencia de diversas áreas clave de desarrollo del conocimiento y sus aplicaciones, especialmente la nanotecnología, la biotecnología, las ciencias cognitivas y las tecnologías de la información y comunicación. Es lo que denominan tecnologías convergentes, y esta exposición nos adentra en los efectos y productos que la convergencia de estas tecnologías está generando ya y que están cambiando sustancialmente nuestro entorno cotidiano. La muestra, creada por



la Fundación La Caixa y ya exhibida en Barcelona, es un despliegue de diseño atrevido que sumerge al visitante en un ambiente de tenue luz. Varias decenas de módulos interactivos y audiovisuales, junto a los paneles explicativos, permiten vislumbrar las consecuencias de una revolución tecnológica que apenas ha empezado a dar sus frutos. La exposición se complementa con talleres y un ciclo de conferencias. Más información: <http://espacio.fundaciontelefonica.com/2014/01/09/tecnorevolucion-la-era-de-las-tecnologias-convergentes/> ▶

## LIBROS

### ***Odón de Buen. Toda una vida***

**Antonio Calvo Roy**

**Ediciones.94-SC. Zaragoza, 2013**

El pasado noviembre se cumplían 150 años del nacimiento de Odón de Buen, un científico español esencial pero olvidado. Naturalista, oceanógrafo, intelectual, político, pionero de la divulgación científica en España y siempre apasionado y polémico, De Buen fue catedrático en la Universidad de Barcelona y en la de Madrid. Aunque nacido en tierras del interior, en Zuera (Zaragoza), descubrió el mar a bordo de la fragata *Blanca*, donde se instruían guardiamarinas y a la que fue invitado, con 22 años, para realizar investigaciones marinas. Aquel viaje determinó su futuro científico y, desde entonces, dedicó su actividad a la creación de laboratorios biológicos marinos en diferentes



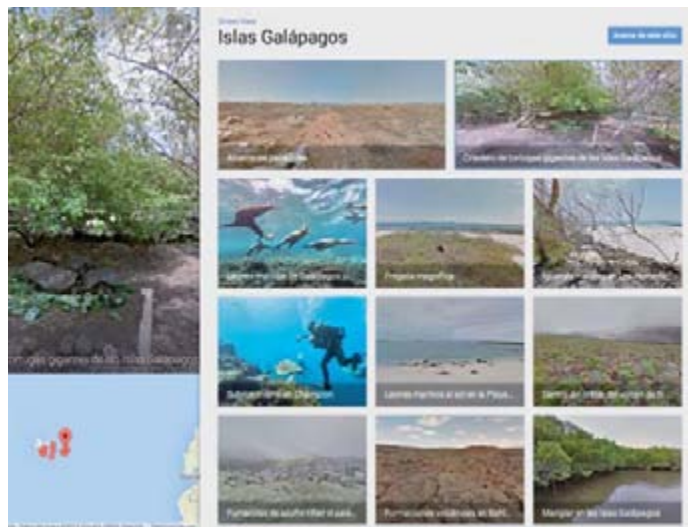
Roy, en una edición de gran calidad. Se trata de una obra amplia y minuciosa, que, no obstante, se lee con pasión, porque la vida de Odón de Buen, que terminó en el exilio mexicano en 1945, fue, como el autor de su biografía dice, digna de una novela. ▶

ciudades costeras. Culminó su tarea con la fundación, en 1914, del Instituto Español de Oceanografía, que este año cumple un siglo de existencia. Con motivo de su sesquicentenario se ha publicado una amplia biografía, escrita por el periodista científico Antonio Calvo

## EN RED

### Un paseo virtual por las islas Galápagos

En los últimos años Google Maps ha hecho posible observar a través de una pantalla y



de forma gratuita, las vistas panorámicas más fascinantes de lugares como las regiones más remotas de la selva amazónica, las montañas más altas del mundo, y la vida marina de la gran barrera de coral de Australia.

Tras cumplirse 178 años de la primera exploración del célebre naturalista Charles Darwin a las islas Galápagos, el buscador, en colaboración con el Parque Nacional Galápagos y la Fundación Charles Darwin (FCD), ha elaborado una serie de videos y álbumes de fotos de 360 grados de la flora y fauna de estas exóticas islas.

Gracias a la herramienta *Street view* ya es posible viajar hasta un lugar único en el planeta, considerado como el paraíso de la biodiversidad, y observar tortugas gigantes

centenarias, nadar junto a los leones marinos, recorrer el interior de un volcán y tomar el sol en la playa junto a curiosas iguanas marinas.

<https://www.google.com/maps/views/streetview/galapagos-islands?gl=us>

### La caída de un gota de brea en directo

En 1927, un profesor de Física de la Universidad de Queensland, en Brisbane (Australia), llamado Thomas Parnell, puso en marcha un curioso experimento: colocó una masa de brea en un embudo esperando a que fluyese

hasta gotear. En estos 87 años han caído nueve gotas, la última en abril de 2014, y ha sido la única que se ha podido ver, aunque no ha caído limpiamente sino que se ha unido a la octava gota. Aunque la brea tiene una apariencia sólida, y se parte en trozos sueltos cuando es golpeada, en realidad se trata de un líquido extremadamente viscoso, que fluye con una parsimonia extrema. El *pitch drop experiment* está reconocido por el libro *Guinness World Records* como el experimento más largo de la historia, y ha recibido el Premio IgNobel, que se otorga a las investigaciones más sorprendentes. Aunque ante la caída de la octava gota, en noviembre de 2000, se colocó un sistema de grabación, un problema técnico impidió grabar el momento. Ahora, se ha podido grabar la ruptura de la novena. El experimento puede ser seguido en directo en internet a través de <http://www.smp.uq.edu.au/content/pitch-drop-experiment>.



## REDES



### CienciaXplora

Un manual para evitar derrochar energía, descubrimientos, videoblogs y reportajes sobre los temas más apasionantes de materias como la astronomía, la ecología y la tecnología.

### Ehfdquímica

Una vía recién abierta para descubrir e intercambiar información sobre la enseñanza, la historia, la filosofía y la divulgación de la química.

### @drosophilas

Estos insectos, comedores de fruta y protagonistas de muchas investigaciones básicas de la biología, dan nombre a un *twitter* cargado de actualidad y divulgación de las ciencias de la vida.

### @materia\_ciencia

La fuente de información científica más prestigiosa del país, de la mano de un grupo de periodistas especializados que nos brindan diariamente la actualidad en ciencia, nuevas tecnologías, investigaciones en salud, y el medio ambiente.

La correcta gestión de los residuos radiactivos exige estar en la vanguardia de la investigación

## Enresa, tecnología de largo plazo

Nacida en los primeros años 80 como respuesta a la necesidad de gestionar los residuos radiactivos de las centrales nucleares, y de los otros usos industriales y médicos que los producen, Enresa es hoy un referente mundial, sobre todo gracias a la instalación de El Cabril, que se ha convertido en un cen-

tro modelo en el manejo de residuos de media y baja radiactividad. Ahora, se enfrenta al reto de tener listo, antes del fin de 2017, el almacén temporal centralizado (ATC), que se instalará en Villar de Cañas (Cuenca).

■ Texto: **Antonio Calvo Roy** | periodista científico ■

**E**n 1984, la Comisión de Industria del Congreso de los Diputados impulsó la creación de una empresa, tal y como ya había ocurrido en Francia, Holanda y el Reino Unido, para gestionar los residuos radiactivos que se producen en las centrales nucleares, en otras instalaciones del ciclo y en todas aquellas industrias, incluidas las sanitarias, en las que se generan. Además, España tendría que prepararse para el futuro desmantelamiento de las centrales nucleares cuando terminasen de operar e ir diseñando, sobre el papel, la solución que habría de adoptarse para el almacenamiento del combustible gastado, temporal o definitiva.

Así, nació una empresa que se ha convertido, dice Álvaro Rodríguez Beceiro, director de su División Técnica, “en la agencia con más competencias del mundo en el campo de los residuos nucleares”. Y es que el más alto responsable técnico de la compañía tiene muy claro el acierto de su creación, tanto desde el punto de vista de las competencias y de la organización como del esquema financiero. “Gracias a ese esquema de financiación, generoso, se pudo contratar una plantilla con alta cualificación, muy medida. Y además, con un funcionamiento como el

de una sociedad anónima, lo que nos dotaba de mucha agilidad a la hora de afrontar los proyectos.”

Ese esquema financiero consiste en un fondo que, hasta el año 2005, se fue alimentado de una tasa sobre la electricidad producida, sin importar su origen, pero que desde entonces empezó a cambiar hasta



Álvaro Rodríguez Beceiro, director de la División Técnica de Enresa.

que, en el año 2010 se decidió “según el principio de quien contamina, paga, que se nutriese en un 80 % a partir de la producción de electricidad nuclear, y el resto mediante un peaje en la tarifa, una tasa a Enusa y unas tasas, menores, al resto de los productores de residuos, en la industria y en el mundo sanitario.” Ese fondo permite desarrollar las actividades y, sobre todo, tener un remanente que asegure la

financiación, incluidos los picos de gasto que suponga la construcción del almacén temporal centralizado u otros. “El esquema de financiación y el de responsabilidad han ido parejos”, dice Rodríguez Beceiro.

En un principio Enresa dependía, a través de su Consejo de Administración, del Ciemat y del INI, es decir, del Ministerio de Industria donde ambos estaban entonces encuadrados ambos, pero en la actualidad depende del Ciemat (Ministerio de Economía), en un 80 %, y en el restante 20 % de la SEPI (Ministerio de Hacienda), y es el Ministerio de Energía, Industria y Turismo el de su tutela.

### El Cabril, primera etapa

El Cabril fue, para Enresa, la primera prueba importante y, en buena medida, su prestigio internacional se basa en el éxito de su realización. En la sierra de Córdoba, en la zona de Hornachuelos, había empezado la Junta de Energía Nuclear (actual Ciemat) a almacenar los primeros residuos nucleares caracterizados en la mina Beta. Y, tras completar los estudios geológicos, se corroboró que era un lugar adecuado para establecer un almacén de residuos radiactivos de media y baja actividad. “Aprovechamos la experiencia francesa, dice Beceiro, que

en aquél momento estaba operando el centro de La Manche y desarrollando su centro de L'Aube, pero como había un cierto decalaje entre ellos y nosotros, pudimos mejorar su proyecto en algunos aspectos. Por eso El Cabril se ha convertido en la instalación modélica en el mundo y nos ha permitido, como empresa, adquirir un notable prestigio y estar presentes luego, como asesores, en todos los proyectos de la Unión Europea relacionados con estas cuestiones.”

Gracias a esa colaboración y a esa diferencia de tiempo, el centro de El Cabril, inaugurado como el francés en 1992, tiene un sistema algo distinto que con el tiempo ha mostrado ser mejor. El sistema emplea una unidad mínima de almacenamiento que es un contenedor de hormigón de unos 11 m<sup>3</sup>, que se almacena en celdas de hormigón. Este concepto modificó el inicial, basado en el almacenamiento y hormigonado de los bultos directamente en la celda.

Los residuos llegan a la instalación en transportes especiales y dentro de barriles de 220 litros de capacidad. Allí, una vez caracterizados, clasificados y acondicionados adecuadamente, se meten en los contenedores de hormigón, que tienen un peso en vacío de 24 toneladas. Una vez

que cada contenedor tienen todos los barriles que le caben, 18, se le inyecta mortero para dejarlos inmovilizados. Y posteriormente estos contenedores se colocan dentro de una de las 28 celdas de almacenamiento, en cada una de las cuales caben 320 contenedores. Esas celdas están repartidas en dos plataformas, una de 12 y otra de 16 unidades. Cuando la celda está llena se cierra con una losa de hormigón que es posteriormente impermeabilizada.

Una vez que esta instalación esté completamente llena, se producirá la restauración ambiental, de manera que quede, visto desde fuera, tal y como estaba antes de que llegaran allí los residuos. De hecho, la restauración fue una de las primeras actividades de Enresa, que tuvo que llevar a cabo en la antigua fábrica de uranio de Andújar, la FUA, que estuvo operativa entre 1959 y 1981; en 1986 Enresa se hizo cargo de ella con los objetivos de evitar riesgos para las personas y el entorno, impedir la dispersión de contaminantes, controlar el flujo de gas radón, garantizar la estabilidad de las estructuras a largo plazo y, finalmente, minimizar la necesidad de mantenimiento. El proyecto se finalizó en 1994, y actualmente está en fase de vigilancia.

“La experiencia de la FUA, dice Rodríguez Beceiro, nos proporcionó conocimientos muy importantes en tres campos para afrontar futuros desmantelamientos: primero, el desmantelamiento en sí, luego el acondicionamiento de suelos y, por último, la restauración vegetal del entorno. Son conocimientos que nos han sido muy útiles en los desmantelamientos posteriores, en Vandellós I y en Zorita. También aportó experiencia para el diseño de las capas de cobertura del almacén centralizado de El Cabril”.

De cara al futuro, contando con la vida útil que aún les queda a las centrales, más el resto de residuos producidos en otras industrias, “aún será necesario casi duplicar la capacidad de este almacén”, dice Beceiro. La generación total de residuos de baja y media actividad se estima en unos 180.000 m<sup>3</sup>, de los cuales más o menos la mitad serán caracterizados como de muy baja actividad, por lo que su almacenamiento puede ser diferente de la otra mitad. Por eso hay una zona en El Cabril para los residuos de muy baja actividad, que tienen un tratamiento distinto de los de baja y media. Y la distinción, a fin de cuentas, es también económica, porque no exigen las mismas medidas de seguridad y almacenamiento unos y otros.



Vista aérea del almacén de residuos de baja y media actividad de El Cabril. Manejo automatizado de los bidones con los residuos y los contenedores donde se alojan.



Vista actual de la central Vandellós I.

Los desmantelamientos de Vandellós I y Zorita, han sido también dos hitos importantes en la actividad de la compañía. Al igual que lo han sido el resto de trabajos en las otras instalaciones del ciclo, sobre todo las minas y plantas de concentrado de Enusa, trabajos que ya han sido llevados a cabo en buena parte. En este momento, una de las tareas señeras es el desmantelamiento de Zorita “que comenzó en el año 2010, aunque la planta paró en 2006. En este momento se está trabajando con la parte de los internos de la vasija, las piezas más activadas. Casi todos los residuos radiactivos del desmantelamiento de una central pueden ir a El Cabril, pero algunas partes no; por ejemplo, estas en las que estamos trabajando ahora. De momento, lo dejaremos en un ATI, un almacén temporal individualizado como el que se usa en Trillo para el combustible gastado, pero la idea es que vayan finalmente al ATC.”

Para llevar a cabo sus trabajos, Enresa funciona como una empresa de ingeniería que controla y supervisa los trabajos, pero que en general no los lleva a cabo directamente. Tiene 332 trabajadores, de los cuales 126 están en Córdoba, en El Cabril. Se trata de una plantilla, dice Beceiro “típica de una empresa

de gestión y en que la que no hay muchos especialistas, sino generalistas. Sí, tenemos personas expertas que pueden hacer cálculos precisos y confirmar datos, pero sobre todo tenemos lo que necesitamos, generalistas capaces de dirigir y controlar los trabajos encargados y llevar a cabo directamente otros bajo nuestra supervisión. Gracias a eso somos una empresa pequeña y eficiente.”

Un Consejo de Administración, presidido Francisco Gil-Ortega y compuesto por miembros que provienen de los ministerios de Economía y Competitividad y del de Industria, del Ciemat y de la Sepi, y algunas otras personas expertas en este campo procedentes del mundo universitario, dirige la compañía, que está dividida en una área técnica, la que dirige Rodríguez Beceiro, y en otras áreas administrativas, jurídicas, económicas y de comunicación, imprescindibles para el funcionamiento de la compañía.

### Pioneros habituales

Una de las características de la empresa es que, con frecuencia, ha tenido que ser pionera en sus actuaciones. Por ejemplo “aunque en Francia hay más centrales como Vandellós I, es la primera de este tipo que se desmantela en el mundo, así que hemos

## El ATC

Desde que se creó Enresa se empezó a pensar en el almacenamiento geológico profundo: la solución que en algunos países se ha elegido como almacén definitivo del combustible gastado. En España, aunque es un objetivo del Plan de Residuos, no hay una decisión tomada todavía en cuanto al programa temporal, pero no será por falta de estudios e informes hechos por Enresa. Mientras, el almacén temporal, una solución en la que se había pensado menos históricamente, aunque la tecnología existía, se ha alzado como la solución transitoria para guardar el combustible nuclear gastado en las centrales. Se inaugurará previsiblemente a finales de 2017 y tendrá una vida de unos 100 años. Así, antes de un siglo habrá que adoptar una solución definitiva para almacenar el combustible, si es que los científicos no han ideado nada mejor que eso para entonces.

“Ha sido un proceso muy lento, hemos tardado mucho, pero creo que ha sido la única manera de poder hacerlo bien, socialmente aceptable y técnicamente adecuado”,

tenido que ser pioneros a la fuerza,” dice Rodríguez Beceiro. Este proceso estará terminado en 2028. “Un desmantelamiento es una cuestión de planificación, de ser muy ordenado. Como tienes que ir quitándolo todo, también tienes que quitar lo que estas utilizando, lo que obliga a tener muy claro qué vas haciendo en cada caso con todo lo que tienes, incluidos los propios residuos, que has de saber dónde dejarlos en todo momento. Si tuviera que definirlo en dos palabras, diría que un desmantelamiento es una cuestión de orden y de gestión de materiales.”



Realización de sondeos en el terreno donde se instalará el ATC.

dice Álvaro Rodríguez Beceiro. “El Parlamento, continua el director técnico de Enresa, nos ayudó mucho, como siempre, impulsando la comisión interministerial que puso en pie el concurso en 2010 y que culminó con la adjudicación a Villar de Cañas en el año 2012”.

Una vez decidido el lugar, se realizó la compra de terrenos y los primeros trabajos, y de hecho, a finales de enero se ha solicitado la licencia para comenzar las primeras labores de construcción. “Esperamos disponer a finales de este año de las autorizaciones previa y de construcción del Ministerio de Industria, las cuales deben contar con los informes favorables del Consejo de

Seguridad Nuclear y del Ministerio de Medio Ambiente (por la Evaluación de Impacto Ambiental). Si es así, empezaremos a construir a comienzos de 2015 y podríamos empezar a operar a finales de 2017 si todo va bien”, dice Beceiro.

En el almacén temporal centralizado (ATC) se guardarán casi 13.000 m<sup>3</sup> de materiales, producto de la operación de las centrales nucleares desde que empezó a funcionar la primera, en 1968. Se trata, como su propio nombre indica, de un único lugar para toda España, enclavado en el municipio conquense de Villar de Cañas, donde se guardará acondicionado el combustible gastado de las centrales nucleares y los residuos

de alta actividad producidos en nuestro país.

“La instalación no genera energía, ni es contaminante”, dice Beceiro. “Almacenará estos materiales en seco y durante 60 años, mediante un sistema de bóvedas modulares. Aquí se centralizarán los procesos necesarios para la gestión temporal de todos los residuos radiactivos de alta actividad, que hasta ahora estaban en las piscinas de las centrales.”

Para Enresa, optar por una solución integral de este tipo minimiza el número de instalaciones nucleares y al mismo tiempo optimiza los recursos, tanto humanos como económicos, destinados a la seguridad física y radiológica del combustible gastado, al centralizar su custodia en un solo lugar. Por otra parte, soluciona la necesidad de gestión del combustible gastado que ya existe en España y, al tratarse de una instalación probada y en funcionamiento en varios países, ofrece más garantías tanto de construcción como de operación. Por último, al igual que ocurrió con la construcción de El Cabril, ir un poco por detrás de otros países, que ya han probado este tipo de almacenes, permite aprovechar lo aprendido. ■

Esa necesidad de estar en la vanguardia, ha impulsado a la empresa a tener una presencia notable en el campo de la investigación y el desarrollo. Así, “invertimos unos 5 o 6 millones al año en I+D, dice Beceiro, lo que ha supuesto unos 150 millones de euros en toda nuestra historia.” Esas investigaciones no se desarrollan dentro de la propia Enresa, sino que se trata de programas que estimulan las investigaciones en universidades y otros centros de referencia.

“Últimamente, dice Beceiro, también tratamos de ir a programas conjun-

tos con otras instituciones interesadas en las mismas investigaciones, por ejemplo con el Consejo de Seguridad Nuclear, puesto que en general se trata de investigaciones muy especializadas. Si hay algo que queremos saber los dos, nos ponemos de acuerdo en el alcance, contenidos y objetivos; buscamos quién puede hacerlo y unimos esfuerzos, con lo que obtenemos mejores resultados.”

Por último, una de las políticas que ha caracterizado a Enresa desde su creación ha sido la de comunicación. No hay periodista interesado que no haya visi-

tado El Cabril ni colegio que, queriéndolo, no haya pasado por su Centro de Visitantes. “Desde su creación, dice Beceiro, el impulso de Juan Manuel Kindelán, primer presidente, por la comunicación ha sido una constante. Siempre hemos sido conscientes de que en estos asuntos no basta con hacer las cosas técnicamente muy bien, había que dedicar esfuerzos a explicarlas, porque si la sociedad no las entiende, las rechaza. Por eso, siempre nos hemos caracterizado por ser una empresa muy transparente y muy implicada en la comunicación.” ©



La absorción de dióxido de carbono atmosférico por los océanos está incrementando su acidez y amenaza sus ecosistemas

## Gastritis marina

La acumulación en la atmósfera del dióxido de carbono procedente de la combustión de recursos fósiles, carbón, petróleo y gas natural, no solo está implicada en el cambio climático del que alertan los científicos. Además de las consecuencias más difundidas, como la subida de las temperaturas, la proliferación de fenómenos catastróficos, los cambios en la distribución de las precipitaciones, el aumento

del nivel del mar y el desplazamiento de ecosistemas, la absorción de este gas por el agua de los mares está provocando una acidificación creciente de los océanos. Los últimos estudios indican que la acidez podría aumentar en un 170 % durante este siglo, con dramáticas consecuencias sobre la vida marina. ■ Texto: **Andrea Jiménez** | periodista científica y bióloga ■

**L**a isla sin tiempo, la bautizó Truman Capote a finales de los años cuarenta, cuando puso un pie sobre Ischia, la mayor de las islas que forman el archipiélago napolitano. No sería el único artista que se inspiraría en la calma que contagian las olas que rompen en sus acantilados y caminos de vegetación árida que

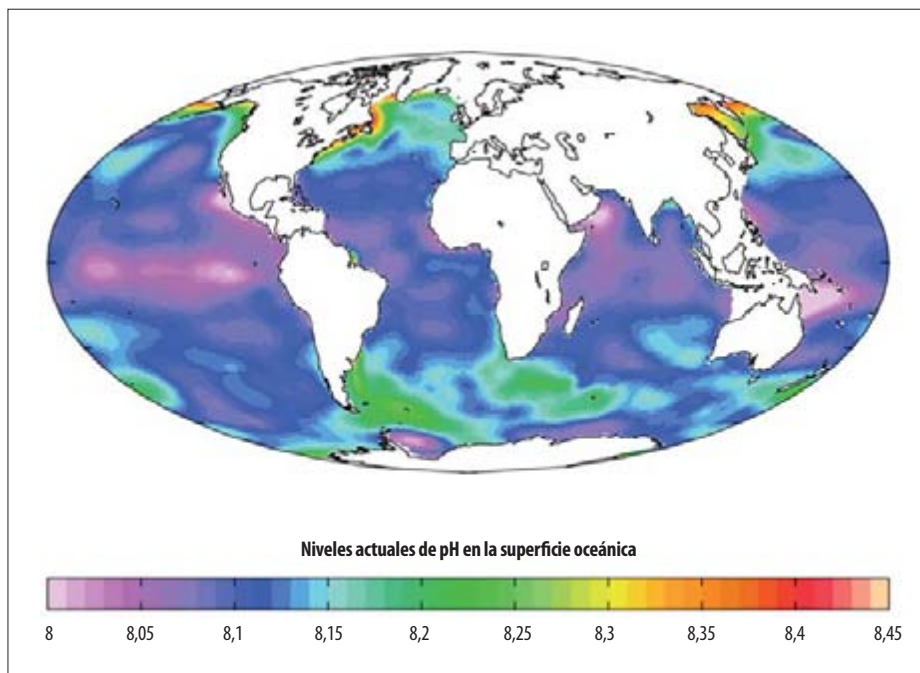
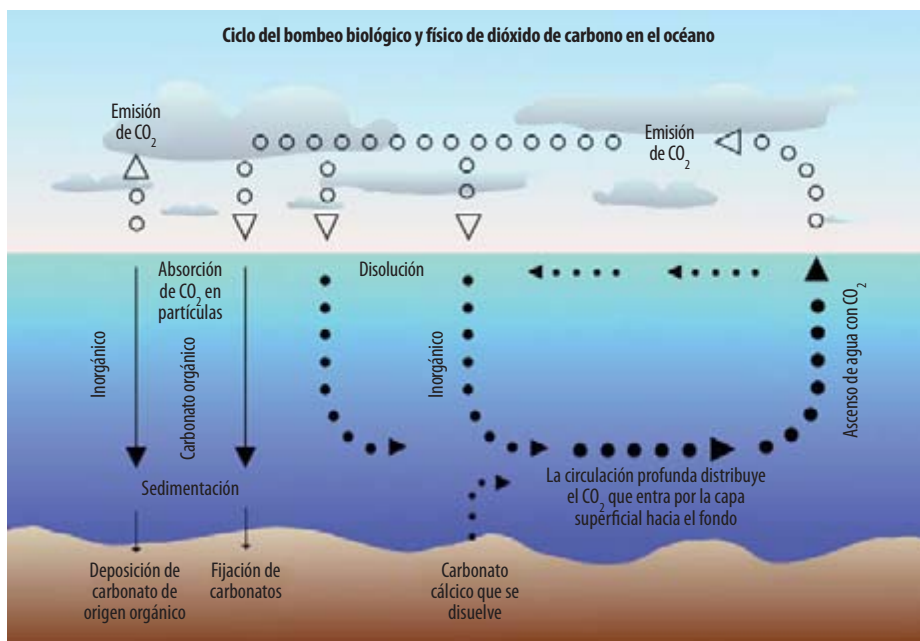
serpentean los viñedos y pinos silvestres de su paisaje. Autores como Pasolini, Stendhal, Montale y W.H. Auden también quedaron prendados por la belleza de las colinas y playas de esta isla bañada en el mar Tirreno, cuyo pico más alto se alza hasta el Epomeo, un volcán que cerró los ojos hace siglos pero cuya actividad

residual ha convertido a este peñasco en uno de los mayores centros termales de la costa amalfitana.

Más allá de los manantiales de aguas termales que brotan de sus rocas como principal atracción turística, la peculiaridad de esta isla reside en haber hecho del ecosistema marino que la rodea un

laboratorio estratégico para investigar uno de los desafíos más importantes de nuestra época: la acidificación de nuestros mares. Desde hace milenios, bajo sus profundos fondos, una caldera incesante ha estado escupiendo burbujas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producto de la actividad volcánica de la isla. Un fenómeno que no solo se ofrece como espectáculo para los submarinistas que bucean esas aguas del golfo, sino como un fenómeno que ayuda a entender mejor las consecuencias del aumento del gas carbónico en la composición química de las aguas oceánicas.

Desde que se empezó a tomar conciencia de que el pH oceánico, relacionado con la concentración de iones de hidrógeno y la acidez o basicidad del medio, estaba disminuyendo y que, por lo tanto, los mares y océanos estaban acidificándose como consecuencia del aumento del dióxido de carbono emitido a la atmósfera por la actividad antropogénica, los expertos han advertido a los gobiernos sobre los posibles efectos devastadores que este fenómeno podría acarrear sobre nuestro planeta. “Tanto las observaciones directas de pH mediante medidas *in situ*, como los correspondientes modelos numéricos de predicción lo llevan advirtiendo desde hace años. Las cifras actuales ya son alarmantes y motivo de preocupación”, asegura Marcos Vázquez, doctor en Oceanografía y Cambio Global por la Universidad de Vigo, refiriéndose tanto a estudios de campo personales como al último informe realizado por un grupo de expertos internacional dirigido por el Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP) que anunciaba que “la acidificación de los océanos podría aumentar hasta un 170 % en este siglo”, y que fue presentado el pasado 18 de noviembre en las negociaciones climáticas que tuvieron lugar en Varsovia (Polonia), dentro del marco de la XIX



Conferencia de las Partes del Convenio de Cambio Climático.

“Si observamos la evolución de las emisiones desde los noventa, se constata que estamos siguiendo las curvas de previsión de los escenarios futuros más pesimistas, con efectos de carácter irreversible, y a la mayor velocidad previsible, incluso superior en algunos casos”, comenta el oceanógrafo que dedicó su tesis doctoral a estudiar la captación en aguas

del Atlántico de  $\text{CO}_2$  antropogénico, así como su acidificación.

“Desde la época preindustrial hasta la actual, el pH promedio de las aguas superficiales de los océanos se ha reducido de un 8,2 a 8,1”, advierte Ulf Riebsell, autor del informe y profesor de oceanografía biológica en el Centro Helmholtz de Investigación Oceánica de Kiel. Aunque esta diferencia es tan solo de una décima, al ser la medida de

## Una biblioteca bajo el mar

“Su dependencia del carbonato cálcico para construir sus esqueletos y la sensibilidad que presentan ante pequeños cambios de temperatura, salinidad y otras condiciones ambientales, convierten a los corales en las principales víctimas de la acidificación de los océanos, así como en uno de los grupos taxonómicos en los que más se han estudiado las repercusiones de este fenómeno”, explica Carles Pelejero, profesor de investigación ICREA en el Instituto de Ciencias del Mar del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Desde que una estancia posdoctoral en Australia aumentó su pasión por la paleoceanografía, la ciencia que estudia los océanos prehistóricos para dar respuesta a los interrogantes del presente, la mayoría de sus líneas de investigación se han centrado en estos animales coloniales.

“En Australia, intentamos reconstruir el pH de los océanos del pasado con los datos recogidos del registro de corales hermatípicos, aquellos masivos que forman los arrecifes”, explica. Este tipo de corales son utilizados como archivos paleoclimáticos, únicos a la hora de ofrecer registros de las condiciones ambientales en escalas de tiempo variables. “Para ello, se obtienen muestras de carbonato cálcico de un periodo y se analizan determinados elementos químicos e isótopos, por ejemplo de boro, para reconstruir datos de temperatura y otras condiciones, como el pH de sus aguas”, explica.

Como un episodio nuevo que añadir al libro geológico de la historia de la Tierra, el análisis isotópico en las muestras hace posible la reconstrucción de diferentes propiedades del océano, en periodos que van desde algunos siglos hasta centenares de millones de años atrás, de manera que sus memorias relatan la evolución química de los mares y la manera en la que

pH una escala logarítmica, implica que desde esta época (que se toma como línea de base puesto que la acidificación antropogénica entonces era nula), los océanos se han acidificado casi un 30 %. “Un aumento del 170 % de la acidificación es algo verdaderamente insólito puesto que supondría una caída del pH de casi 0,4 unidades, lo cual es propio de escalas temporales geológicas del orden de 100.000 años, es decir de transiciones glaciales-interglaciales”, aclara Vázquez. Si bien el fenómeno de la acidificación oceánica no es nuevo en nuestro planeta, las diferencias entre el presente episodio y el de cualquier otra época anterior son su origen antrópico y, sobre todo, la velocidad con la que se está produciendo, debido a que las tasas de aumento del  $\text{CO}_2$  atmosférico (causante directo de la acidificación) son del orden de 100 veces superiores a las de cualquier registro paleoceanográfico.



Carles Pelejero, investigador del Instituto de Ciencias del Mar.

Además de hacer posible la existencia de la vida en la Tierra, producir la mitad del oxígeno con el que cuenta la atmósfera, y amortiguar los cambios de temperatura globales, el océano representa el mayor sumidero de dióxido de carbono del planeta, llegando a absorber diariamente algo más de 20 millones de toneladas métricas de este gas. Desde el siglo XVIII, más de 460.000 millones de toneladas de dióxido de carbono han sido absorbidos por los océanos, en torno a un tercio del liberado por las actividades humanas en ese periodo, disminuyendo su exceso en la atmósfera y reduciendo así los impactos asociados al calentamiento global. Pero esta ayuda no es gratuita. “A medida que

este compartimento ambiental almacena mayor cantidad de  $\text{CO}_2$ , dicha capacidad de absorción no solo comienza a disminuir, sino que esa disolución es la responsable única y directa del proceso de acidificación” explica Vázquez. A pesar de que

algunos elementos químicos presentes en el agua amortiguan este proceso, su capacidad es limitada, y en algunas zonas se están alcanzando e incluso excediendo ya los límites.

Uno de los indicadores al que recurren los investigadores para medir la tasa de acidificación de los océanos y sus efectos en algunos organismos, es el nivel de saturación de la aragonita, una de las formas cristalinas del carbonato cálcico que precisan algunos animales, como los corales, para formar sus esqueletos. En condiciones normales este mineral se encuentra estable en las aguas superficiales, disponible para que los organismos se sirvan de él, pero el aumento de la concentración de dióxido de carbono en el agua, produce la insaturación de iones de carbonato, lo que incide en la tasa de calcificación y dificulta la biodeposición de este mineral y la formación de estructuras y exoesqueletos calcáreos.

La principal fuente de información sobre la evolución de estos parámetros es la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) estadounidense, que mantiene un programa de estudio de

esta ha afectado a las especies. Para entender y estudiar hasta qué punto podrían modificarse los ecosistemas marinos y su biodiversidad, si los océanos llegaran al nivel de acidificación que predicen los últimos modelos, los científicos recurren a la transición entre el Paleoceno y el Eoceno, hace unos 55 millones de años, cuando determinadas formas de metano que se encontraban almacenadas en los sedimentos oceánicos se oxidaron a dióxido de carbono y provocaron un aumento de la temperatura global de entre 5 y 8 grados y los océanos alcanzaron unos niveles de pH similares a los que se podrían alcanzar en un futuro no muy lejano". Al observar los testigos sedimentarios que abarcan esta época, solo se ven arcillas, no hay rastros fósiles de carbonato cálcico". Lo que explica que los corales y demás especies que construyen su esqueleto con este compuesto químico, sean los primeros perjudicados por este fenómeno. 

Programa para la monitorización de los arrecifes coralinos de la Agencia Nacional de Investigación Oceánica y Atmosférica (NOAA) estadounidense.



la acidificación del océano y, regularmente, supervisa y coordina la vigilancia química de los carbonatos marinos. Este programa forma parte del Plan Nacional de Monitoreo de Arrecifes de Coral, establecido para estudiar y conservar estos ecosistemas. Los datos obtenidos permiten documentar y elaborar mapas de la dinámica de la acidificación oceánica y llevar a cabo un seguimiento del estado y las tendencias de respuesta de los ecosistemas.

Si la acidificación de las aguas oceánicas llegara a los límites predichos por los últimos modelos, todos aquellos organismos calcificadores, como algunos moluscos, crustáceos o equinodermos, que construyen sus conchas y esqueletos a partir de los sedimentos de este mineral, podrían estar caminando sobre la cuerda floja de su supervivencia. De hecho, existen ya evidencias de que las conchas de los pterópodos, una familia de pequeños caracoles marinos endémicos de los trópicos, se están disolviendo en pedazos en algunas zonas del océano Austral que rodea la Antártida. "Estos moluscos representan una pieza clave en la red trófica de las regiones polares,

donde sirven como fuente de alimento fundamental para el salmón rosado, entre otras especies de alto valor comercial. Las consecuencias de la desaparición de esta especie serían catastróficas", explica Wendy Broadgate, directora adjunta del IGPB y una de las autoras principales del informe.



Wendy Broadgate, directora adjunta del IGPB.

No obstante, no todas las especies marinas saldrían mal paradas por el aumento de la acidificación, sino que algunas de ellas pueden sacar hasta beneficio, como así evidencian los últimos estudios científicos que se han llevado a cabo en

los alrededores de Ischia, donde los respiraderos volcánicos submarinos que subyacen bajo la isla sirven como experimentos naturales a gran escala de los efectos de las emisiones de CO<sub>2</sub>. "La acidificación del agua ha alterado la ecología de la zona, disminuyendo su biodiversidad. Entre otras especies representativas, destaca la ausencia de las algas calcáreas, principales cementadoras de los arrecifes. Pero más llamativo es que ha aumentado la productividad de la fotosíntesis de ciertos tipos de fitoplancton y praderas marinas, favoreciendo su metabolismo y haciéndolas proliferar", expone Vázquez. "Los cambios en los organismos que prosperan en aguas más ácidas, como los observados en la bahía napolitana, darán lugar a cambios en los ecosistemas, pero todavía no sabemos si serán capaces de adaptarse a la acidificación del océano. Se necesitan estudios a más largo plazo", añade Broadgate.

Exceptuando las cinco grandes extinciones masivas, en las que la mayoría de las especies que representaban la vida por aquellas eras perecieron, a lo largo del tiempo, los ecosistemas marinos, se han ido transformando como resultado de



Buque oceanográfico alemán Poseidón.

## Laboratorios flotantes en Canarias

Con 2.400 toneladas de equipos científicos a bordo llegaba el buque oceanográfico alemán Poseidón a aguas canarias, el pasado febrero, como parte del KOSMOS 2014 GC, un proyecto para estudiar los impactos futuros de la acidificación en mar abierto.

La investigación, liderada por el Centro GEOMAR Helmholtz para la Investigación Marina de Kiel (Alemania) y en la que participan 70 científicos de 14 instituciones diversas (entre ellas tres españolas), permitirá hacer de esta zona del Atlántico el escenario donde analizar por primera vez cómo afecta el fenómeno a los ecosistemas oligotróficos, aquellos pobres en nutrientes y por lo tanto de baja productividad, que son los que representan el 80% del océano.

Para ello, los investigadores instalaron cerca del banco de ensayos de la Plataforma Oceánica de Canarias nueve mesocosmos, laboratorios flotantes en los que se introduce dióxido de carbono hasta llegar a niveles similares a los que se prevé alcanzar en 2100, para simular y estudiar el comportamiento de los ecosistemas a largo plazo ante la inyección del gas.

“Se realizarán muestreos y análisis cada dos días, y se medirán hasta 50 parámetros diferentes”, dijo Ulf Riebesell, investigador principal del proyecto al servicio de noticias científicas SINC. Además, se introducirán larvas de peces para conocer la evolución que sufren en estas condiciones las especies con importancia económica.

Por otro lado, los enormes tubos de ensayo servirán para imitar la fertilización natural que tiene lugar en esta zona del Atlántico, simulando episodios de afloramiento, el movimiento vertical que hace ascender a las masas de agua oceánica profunda hasta la zona superficial.

El proyecto también contempla introducir polvo sahariano, como un aporte de nutrientes a estas aguas menos productivas con el objetivo de observar su efecto en el proceso de acidificación en organismos marinos.

El experimento, de unas ocho semanas de duración, finalizará en abril, pero en 2015 se trasladará a las aguas del Pacífico, en Perú, donde los científicos podrán seguir arrojando nuevos datos sobre las reacciones de los ecosistemas marinos ante un posible episodio de rápida acidificación de los océanos. ►

su adaptación a las nuevas condiciones ambientales. Y aunque algunos confían en que la mayoría de las especies, siguiendo los principios darwinistas, respondan por sí mismas a las grandes alteraciones que puedan tener lugar en la composición química de los océanos, otros se muestran menos optimistas ante la posible respuesta de la biodiversidad oceánica. “Esos cambios que hasta ahora se han dado, y que han provocado la adaptación y la evolución de muchas especies, eran muy graduales, de manera que los organismos tenían el tiempo necesario para adaptarse. Se les daba una *oportunidad evolutiva*, mientras que uno de los aspectos más críticos del episodio de acidificación actual es la tasa con la que está ocurriendo, como mínimo diez veces más rápida que en los últimos centenares de millones de historia geológica de Tierra”, argumenta Vázquez.

Aunque los científicos desconocen muchos de los cambios en los ecosistemas marinos que produciría el aumento tan acusado de la acidificación de los mares, algunas de sus consecuencias son evidentes. Ya existen certezas de cómo afectaría a procesos tan fundamentales como las tasas de crecimiento, reproducción, resistencia y otros procesos biológicos y fisiológicos de muchas especies. Por otro lado, la degradación de los arrecifes corales tropicales, así como la disminución en la productividad de la acuicultura de moluscos, puede generar pérdidas económicas considerables. “Se verían afectados el turismo, la seguridad alimentaria y la protección del litoral de muchos de los países más pobres del mundo. Las personas que dependen de los servicios de los ecosistemas de los océanos como principal fuente de alimento e ingresos, son especialmente vulnerables”, advierte Riebesell.

Las soluciones puestas sobre la mesa hasta ahora, como las geoingenieras

a gran escala, no parecen de ningún modo satisfactorias. “Los métodos que se centran únicamente en la temperatura, como la retrodispersión de aerosoles o la reducción de gases de efecto invernadero distintos del  $\text{CO}_2$ , no impedirán la acidificación del océano” apunta Broadgate. Por otro lado, la adición de minerales alcalinos en el océano, como se ha sugerido por distintos expertos, sería eficaz y económicamente viable solo a muy pequeña escala, como en determinadas regiones costeras, y las involunta-



Marcos Vázquez, doctor en Oceanografía y Cambio Global por la Universidad de Vigo.

rias consecuencias que podría tener son totalmente desconocidas. Para Vázquez este remedio sería como “pretender combatir el calentamiento global echando cubitos de hielo al mar”. Inyectar y almacenar el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera directamente en las profundidades del océano, como se ha probado en algunos lugares, tampoco parece una alternativa viable. El océano profundo es uno de los ecosistemas más frágiles que existen. Se encuentra tan aislado de las alteraciones externas y tiene condiciones tan estables que es de esperar que los organismos que viven allí tengan una respuesta de adaptación nula o muy limitada. Sus posibilidades de supervivencia ante una inyección directa de hidratos de  $\text{CO}_2$  y la rápida acidificación que ello supondría son prácticamente

nulas, e inciertas en el mejor de los casos. “Por otro lado, sus aguas no permanecen quietas, están las corrientes de aguas profundas que forman parte de la cinta transportadora oceánica. Y existe el riesgo de que esos pozos artificiales de  $\text{CO}_2$  regresen con el tiempo a la superficie y se liberen nuevamente a la atmósfera, o que se desplacen a otras regiones abisales donde causarían alteraciones no previstas” explica el oceanógrafo. Las regiones basálticas en las que se ha considerado el almacenamiento en

profundidad del  $\text{CO}_2$  son famosas por su actividad sísmica, otro de los problemas potenciales que debe considerarse antes de llevar a cabo actuaciones de geoingeniería de tal magnitud.

El único remedio, según el consenso más general, es llevar a cabo un cambio energético para reducir y estabilizar los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera. No obstante, los expertos no se muestran satisfechos con la última conferencia del Convenio de Cambio Climático, que se celebró en Varsovia a finales de 2013. “Cada año que se retrasa el cumplimiento de los compromisos de los gobiernos en la reducción de las emisiones, las consecuencias son mayores para los océanos y para la sociedad”, lamenta Broadgate. El informe presentado allí es aplastante, y las exigencias de la comunidad científica



Tomando muestras de carbonato cálcico de arrecifes del atolón Clipperton.

hacia los gobiernos son firmes: “tenemos la responsabilidad de parar esto”. En caso contrario, la acidificación de los océanos no solo será uno de los factores que nos han introducido en la era del Antropoceno, el nuevo periodo actual geológico originado por la actividad humana, como sugieren algunos expertos. Si no se frenan las emisiones actuales, podrían volver a suceder episodios como el de hace 250 millones de años, cuando las erupciones volcánicas y la liberación de metano llegaron a duplicar los niveles de carbono atmosférico, que causó la mayor extinción en masa de todos los tiempos. “Evitar que nuestros océanos alcancen tales niveles de acidificación no consiste en querer salvar el mar, los ecosistemas marinos, o los peces, sino salvarnos a nosotros mismos”, concluye Vázquez. ©

# Panorama

## Comparecencia del presidente del CSN ante el Congreso de los Diputados

Fernando Marti Scharfhausen, presidente del Consejo de Seguridad Nuclear, compareció el 12 de marzo ante la Comisión de Industria, Energía y Turismo del Congreso de los Diputados, para presentar el informe de las principales actividades desarrolladas por el organismo durante el año 2012. Empezó agradeciendo a los grupos parlamentarios su apoyo para situar al CSN entre los sectores excluidos de la tasa de reposición cero en los Presupuestos de 2014, lo que permite nuevas incorporaciones de personal técnico para afrontar los retos futuros.

El presidente destacó el buen funcionamiento de las centrales nucleares españolas durante 2012 y los planes de mejora de la seguridad a partir de las lecciones aprendidas del accidente de Fukushima, como la implantación de nuevos equipos de respuesta ante pérdidas prolongadas de suministro eléctrico exterior, la mejora de los sistemas de comunicación en emergencias o la optimización de inyección alternativa de agua al sistema de refrigeración. Marti Scharfhausen señaló que en 2012 se realizaron 158 inspecciones a las centrales nucleares, 69 a transportes de



materiales radiactivos y 1.790 a instalaciones radiactivas; y que el número de trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes fue de 105.605.

También expuso los aspectos más relevantes del año 2013 y las futuras líneas de actuación previstas durante su mandato. Repasó la situación de la central nuclear de Santa María de Garroña y del Almacén Temporal

Centralizado (ATC) de residuos radiactivos, sobre el cual el CSN está elaborando un programa de trabajo “para dar la respuesta adecuada, en los aspectos relacionados con la seguridad nuclear y la protección radiológica”, y recordó que el Pleno del CSN tomó la decisión de crear el cargo de coordinador y coordinador adjunto del proyecto. ▶

## El consejero Castelló inaugura la Jornada sobre Centrales Nucleares de la SNE

El pasado 26 de febrero tuvo lugar la Jornada sobre Centrales Nucleares de la Sociedad Nuclear Española (SNE) en cuya inauguración participó el consejero del CSN, Fernando Castelló. Esta jornada cuenta cada año con la participación de representantes de las empresas e instituciones eléctricas, así como de las centrales nucleares españolas, para tratar los aspectos más relevantes de su operación durante el ejercicio previo.

En su intervención, dentro de las actividades del año



2013, el consejero Castelló mencionó la renovación del Pleno del CSN y la orientación del trabajo para el avance en la información y la

transparencia hacia la sociedad en general. Asimismo, hizo hincapié en las acciones de mejora llevadas a cabo por los titulares de las instalaciones durante 2013, así como las que tendrán que ejecutar en años sucesivos. Destacó los desarrollos de los protocolos de respuesta ante emergencias en el marco de las lecciones aprendidas del accidente de Fukushima.

Además, mencionó uno de los retos de futuro ante el que se enfrenta el organismo regulador: el Almacén Tem-

poral Centralizado. Las actividades del CSN se han centrado en el análisis del *Plan de caracterización del emplazamiento* y del *Programa de garantía de calidad* de esta instalación y, adelantándose a la llegada de las solicitudes de autorización previa y de construcción, en noviembre de 2013 el Pleno del CSN tomó la decisión de dotar de una estructura interna adecuada, nombrando a un coordinador y a un adjunto al coordinador para las tareas relacionadas con el ATC. ▶



## La Plataforma Ceidén analiza las líneas de trabajo 2014-2015

El consejo gestor de la Plataforma Tecnológica de I+D+i de Energía Nuclear de Fisión (Ceidén) mantuvo una reunión el pasado 13 de marzo, en la sede del Consejo de Seguridad Nuclear, para analizar las líneas de trabajo que afrontará en el periodo 2014-2015, entre otras cosas. La jornada fue coordinada por la vicepresidenta del CSN, Rosario Velasco, que el pasado mes de noviembre fue nombrada presidenta de esta Plataforma.

En la actualidad, Ceidén desarrolla varios programas de investigación relacionados con el comportamiento de los materiales de la central nuclear José Cabrera, los internos de la vasija del reactor y los hormigones que fueron empleados en su construcción. Ceidén también participa en el consorcio del reactor experimental Jules Horowitz, que se encuentra en fase de construcción avanzada en Cadarache (Francia) y, además, acoge grupos de trabajo tales como el grupo de formación y el grupo de usuarios de laboratorios de patrones neutrónicos.

## Reunión del Comité de Actividades Reguladoras Nucleares de la NEA

París acogió la trigésima reunión del Comité de Actividades Reguladoras Nucleares (CNRA) de la Agencia de Energía Nuclear (NEA), que se celebró entre el 2 y el 3 de diciembre de 2013. Por parte del Consejo de Seguridad Nuclear, participaron la consejera Cristina Narbona y el director técnico de Seguridad Nuclear, Antonio Munuera. Durante el encuentro, los responsables de cada grupo de trabajo explicaron los progresos realizados



en cada uno de ellos. También se analizaron los avances realizados por el Comité y la implementación del Plan de Acción de Seguridad Nuclear del OIEA, que estará integrado en las actividades ordinarias del organismo a partir de 2015. Por parte del CSN, se abordó el cese de la operación de Santa María de Garoña, el Almacén Temporal Centralizado y la renovación del permiso de explotación de la central nuclear de Trillo, prevista para 2014. La próxima reunión del Comité se celebrará en junio de 2014.

## El consejero Gurguá participa en la XXVI Conferencia RIC

La Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC) organizó en North Bethesda (Maryland), entre el 11 y el 13 de



marzo, la Conferencia de Información Reguladora (RIC), uno de los principales foros de intercambio de información y experiencias. En la edición de este año, la vigésima sexta, participaron alrededor de 3.300 expertos procedentes de 30 países. La delegación del Consejo de Seguridad Nuclear estuvo formada por el consejero Antoni Gurguá, la secretaria general, María Luisa Rodríguez, y la directora técnica de Protección Radiológica, María Fernanda Sánchez.

El programa estaba dividido en sesiones técnicas, paneles de discusión y presentaciones sobre cuestiones de actualidad para los organismos reguladores, la administración y la industria. Antoni Gurguá intervino en la sesión de reguladores internacionales, en la que se presentó una visión general sobre los hitos a los que se ha enfrentado cada organismo regulador durante el año anterior, así como los objetivos que se plantean para el futuro.



## Visita de los diputados de la Ponencia del Congreso al CSN

Diputados miembros de la Ponencia encargada de las relaciones con el CSN, de la Comisión de Industria, Energía y Turismo del Congreso de los Diputados, visitaron el 9 de enero la sede del Consejo de Seguridad Nuclear. José Segura, Guillermo Mariscal, Jordi Jane, Sebastián González, Francesc Vallés y Antonio Erias fueron

recibidos por todos los miembros del Pleno, encabezados por su presidente, y visitaron la Sala de Emergencias (Salem), donde estuvieron acompañados por los dos directores técnicos, y el Centro de Información donde, a través de módulos interactivos, se explica todo lo relacionado con las radiaciones ionizantes.

## El Consejo de Administración de REE visita el Consejo

El pasado 28 de enero visitaron la sede del Consejo de Seguridad Nuclear los miembros del Consejo de Administración de Red Eléctrica de España (REE), encabezados por su presidente, José Folgado Blanco. Fueron recibidos por el presidente del organismo, Fernando Martí Scharfhausen, los restantes miembros del Pleno y los directores técnicos. En la Sala de Emergencias (Salem), recibieron información sobre la organización y funciones del CSN, a través de presentaciones realizadas



por varios técnicos del organismo regulador. Especial énfasis tuvo la explicación de la Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE), en la que se analizaron diversos escenarios, como el de la pérdida total de suministro eléctrico, cuya importancia se puso de manifiesto en el accidente de Fukushima.

## Vigésima Jornada Anual sobre Vigilancia Radiológica Ambiental

El pasado 27 de noviembre tuvo lugar en el salón de actos del CSN la vigésima Jornada Anual sobre Vigilancia Radiológica Ambiental, en la que se presentaron los resultados de la campaña de intercomparación analítica 2012 y 2013. Estas campañas consisten en la comparación de los resultados obtenidos del análisis de una misma muestra por los diferentes laboratorios de ensayo existentes



en España, para demostrar la fiabilidad de los datos que producen, evaluar las habilidades del personal y las ca-

racterísticas de los métodos de ensayo, y detectar anomalías, mejorar procedimientos y comprobar su competencia

técnica. El análisis elaborado en 2012 correspondió a una muestra de suelo, y el de 2013 en la medida de niveles de radiación gamma ambiental mediante el uso de dosimetría de termoluminiscencia. También se presentaron los contenidos de los que se compondrá la campaña del próximo año. El consejero Fernando Castelló fue el encargado de clausurar la jornada.

# Acuerdos del Pleno

## Supervisión y seguimiento de la central de Santa María de Garoña

El actual Sistema Integrado de Supervisión de las Centrales (SISC) se basa en el análisis de parámetros que son de difícil aplicación a la situación de cese definitivo de la explotación en la que actualmente se encuentra Santa María de Garoña, por lo es necesario establecer un nuevo sistema de supervisión más adecuado, sin los indicadores en los que se basan los análisis del SISC y sin el código de colores usado para los hallazgos de inspección.

Por ello, el Pleno del Consejo aprobó por unanimidad, en su reunión del 8 de enero de 2014, un nuevo Sistema de Supervisión y Seguimiento de la central nuclear de Santa María de Garoña.

## Criterios de evaluación en las modificaciones de diseño post-Fukushima

El Pleno del Consejo, en su reunión del 28 de diciembre de 2013, aprobó por unanimidad el documento “Criterios de evaluación a considerar en las modificaciones de diseño post-Fukushima” que recoge las pautas que, con carácter general y de modo homogéneo, deberán aplicar los evaluadores del organismo regulador en su valoración de las mejoras que van a introducir los titulares en respuesta a las ITC post-Fukushima. El documento completo puede consultarse en el anexo I del acta de la reunión, disponible en [www.csn.es](http://www.csn.es).

## Modificación de diseño del panel de parada alternativo de Almaraz I y II

En su reunión del 11 de diciembre de 2013, el Pleno del Consejo aprobó, con determinadas condiciones, el informe sobre modificación de diseño de

la implantación y puesta en servicio del panel de parada alternativo para las dos unidades de la central nuclear de Almaraz, junto con los cambios de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento y las secciones del Estudio de Seguridad asociadas. Se da así cumplimiento a la condición 9.1 y a la Instrucción Técnica Complementaria, ITC 10, de la autorización vigente.

## Instrucción de Seguridad IS-10 sobre criterios de notificación de sucesos de las centrales nucleares

El Pleno del Consejo aprobó por unanimidad el 4 de diciembre de 2013, la revisión 1 de la Instrucción de Seguridad IS-10, que establece los criterios de notificación de sucesos al CSN por parte de las centrales nucleares. La revisión tiene por objetivo facilitar y clarificar el proceso y modifica tanto las condiciones generales de notificación, como los tipos de sucesos que se van a notificar. Están excluidos del alcance de esta instrucción los sucesos relacionados con protección física, que se someten a una normativa específica del Consejo de Seguridad Nuclear.

El proyecto de revisión de la Instrucción de Seguridad IS-10 fue enviado al Congreso de los Diputados para recabar los comentarios oportunos.

## Instrucción de Seguridad IS-35 sobre diseño de bultos de transporte de material radiactivo

En su reunión del 4 de diciembre, el Pleno del Consejo aprobó la Instrucción de Seguridad IS-35 sobre las modificaciones de diseño de bultos de transporte de material radiactivo con certificado de aprobación de origen español y sobre las modificaciones físicas o de operación que

realice el remitente de un bulto sobre los embalajes que utilice, independientemente de que el bulto tenga que disponer de certificado de aprobación de diseño, de acuerdo con lo establecido por la reglamentación aplicable.

El proyecto de revisión de la Instrucción de Seguridad IS-35 fue enviado al Congreso de los Diputados para recabar los comentarios oportunos.

## Evaluación de impacto ambiental del ATC y del centro tecnológico asociado

El Pleno del CSN aprobó el 23 de octubre de 2013 el informe elaborado para dar respuesta a la consulta de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, sobre la amplitud y nivel de detalle que debe darse al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Almacén Temporal Centralizado (ATC) y del Centro Tecnológico Asociado (CTA), en el término Municipal de Villar de Cañas (Cuenca).

Las evaluaciones realizadas por las direcciones técnicas del CSN concluyeron que el contenido de la información incluida en el documento inicial, presentado por Enresa, no recogía toda la información necesaria para valorar las posibles vías de dispersión de la radiactividad y sus posibles impactos radiológicos. No se considera necesaria su modificación, dado que el CSN dispondrá de toda la información detallada que se precise dentro del proceso de licenciamiento de la instalación. El futuro Estudio de Impacto Ambiental deberá recoger la información pormenorizada sobre el emplazamiento y su instalación.

El Pleno encargó la gestión de los asuntos relacionados con dichos trabajos al consejero Fernando Castelló, que aceptó el encargo y deberá informar periódicamente de su evolución. ©

# El CSN informa

Información relativa al tercer y cuarto trimestres de 2013

## Centrales nucleares

### Almaraz I y II

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 0  |
| Paradas no programadas     | 0  |
| Nº inspecciones del CSN    | 20 |
| Actividades                |    |

La unidad I permaneció operando a plena potencia sin incidentes durante todo el periodo.

La unidad II estuvo operando a plena potencia hasta el 24 de noviembre, fecha en la que inició la parada para la vigésimoprimer recarga de combustible.

### Ascó I y Ascó II

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 3 en Ascó I (INES 0) |
| Paradas no programadas     | 0                    |
| Nº inspecciones del CSN    | 16                   |
| Actividades                |                      |

La unidad I se mantuvo operando al 100% de potencia nuclear, excepto del 19 al 20 de noviembre, cuando bajó al 75% por una avería programada de agua en el río Ebro con posible presencia de algas. Del 18 al 20 de diciembre se bajó al 84% de potencia nuclear para la reparación de un poro en un tubo de la caja A2 del condensador.

La unidad II se mantuvo operando al 100% de potencia nuclear, excepto el 30 de agosto, fecha en la que se bajó al 98,2% para realizar el PV-97 (operabilidad de las válvulas de la turbina); y del 19 al 20 de noviembre, en que se bajó al 74% de potencia como la unidad I.

### Cofrentes

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 0  |
| Paradas no programadas     | 0  |
| Nº inspecciones del CSN    | 22 |
| Actividades                |    |

La central operó de manera estable hasta el día 21 de septiembre, cuando se inició la parada para realizar la decimonovena recarga de combustible, que finalizó el 31 de octubre. Se produjeron bajadas parciales de potencia superiores a un 10% en los días 4 y 25 de agosto para la extracción de las barras de control.

### Santa María de Garoña

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 0 |
| Paradas no programadas     | 0 |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nº inspecciones del CSN | 7 |
| Actividades             |   |

La central permanece en parada programada desde el 16 de diciembre de 2012.

El 5 de julio, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo declaró el cese definitivo de la explotación. El 10 de julio, el CSN emitió las Instrucciones Técnicas Complementarias asociadas a dicha declaración y el 15 de julio las asociadas a las pruebas de resistencia.

### Trillo

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 1 (INES 0) |
| Paradas no programadas     | 2          |
| Nº inspecciones del CSN    | 14         |
| Actividades                |            |

La central ha operado sin incidencias relevantes excepto el 2 de diciembre cuando se paró el reactor para reparar una fuga de aceite en el cojinete radial de la turbina de baja presión nº 3. También hubo una bajada de potencia, hasta el 85%, debida a un aumento de conductividad del secundario, que no tuvo consecuencias para la seguridad.

El 15 de noviembre de 2013, el titular presentó la documentación para la renovación de la autorización de explotación por un periodo de diez años.

### Vandellós II

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 7 (INES 0) |
| Paradas no programadas     | 1          |
| Nº inspecciones del CSN    | 12         |
| Actividades                |            |

El periodo se inició con la central al 100% de potencia. El día 16 de julio se redujo al 89% para realizar una intervención de mantenimiento en los equipos del circuito secundario. El 26 de octubre, se produjo una parada automática por actuación del sistema de protección del reactor, que recuperó su operación el mismo día. El 1 de noviembre se inició la parada para la recarga de combustible, hasta el 15 de diciembre. Del 18 al 23 de diciembre se redujo potencia al 73% para realizar operaciones de mantenimiento en el transformador de salida.

## Instalaciones del ciclo y en desmantelamiento

### Ciemat

#### PIMIC-Rehabilitación

Se han finalizado totalmente las actividades de rehabilitación de la instalación IN-04 (celdas calientes metalúrgicas).

Se continúa con la limpieza y rehabilitación de las zonas incluidas en el proyecto de recuperación del centro.

**PIMIC-Desmantelamiento**

Durante este periodo se han reiniciado las actividades de Enresa. Se está trabajando en el plan de pruebas para la desclasificación de tierras de El Montecillo y se ha finalizado el acondicionamiento de la zona de la Carpa del Montecillo para su uso como depósito transitorio de residuos radiactivos de muy baja actividad.

Se continúan los trabajos de sondeos en los alrededores de La Lenteja y de la celda F1, para la obtención de datos de caracterización operacional.

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nº inspecciones del CSN | 5 |
|-------------------------|---|

**Centro de Saelices el Chico****Planta Quercus**

Enusa presentó en octubre una nueva solicitud de autorización del desmantelamiento de la planta, conforme con la resolución de la Dirección General de Política Energética y Minas que denegaba la prórroga de la suspensión temporal de su proceso de licenciamiento.

El titular ha presentado también nuevas propuestas de revisión del Reglamento de Funcionamiento y del Plan de Emergencia Interior, un análisis de riesgo de incendios y un plan de protección contraincendios de la instalación.

Continúan sin incidencias las actividades asociadas a los programas de vigilancia.

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nº inspecciones del CSN | 1 |
|-------------------------|---|

**Planta Elefante**

Continúan sin incidencias las actividades asociadas a los programas de vigilancia.

Se ha recibido una propuesta de modificación del Programa de Vigilancia y Control de las Aguas Subterráneas y de Estabilidad de Estructuras.

**Instalaciones mineras**

Durante el tercer trimestren el CSN emitió un dictamen sobre la solicitud presentada por Berkeley Minera España, S.A. (BME) relativa a la autorización previa como instalación radiactiva de primera categoría del ciclo del combustible nuclear de la planta de beneficio de mineral de uranio de los yacimientos de Retortillo-Santidad en Salamanca, así como sobre el otorgamiento de la concesión de explotación de recursos de uranio de dichos yacimientos.

El CSN informó favorablemente la prórroga del permiso de investigación minera de BME en cuatro nuevas fracciones mineras incluidas en el perímetro del permiso de investigación de Pedreras (Salamanca).

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nº inspecciones del CSN | 1 |
|-------------------------|---|

**Fábrica de uranio de Andújar****Actividades**

La instalación sigue bajo control, en el denominado periodo de cumplimiento, posterior al desmantelamiento.

**Nº inspecciones del CSN****0****El Cabril****Actividades**

La instalación sigue operativa, sin incidencias significativas. Se han realizado las operaciones habituales para la gestión de residuos radiactivos de baja y media actividad, y de muy baja actividad.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nº de sucesos (nivel INES) | 0 |
|----------------------------|---|

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nº inspecciones del CSN | 6 |
|-------------------------|---|

**Vandellós I****Actividades**

La instalación sigue en situación de latencia y bajo control, sin observarse incidencias significativas.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nº de inspecciones del CSN | 1 |
|----------------------------|---|

**José Cabrera****Actividades**

Continuaron las actividades de desmontaje de componentes y elementos del circuito primario.

Desde finales de agosto hasta el 31 de octubre se realizó el traslado al ATI de los residuos especiales generados durante las actividades de segmentación de los internos de la vasija del reactor. También se iniciaron las operaciones preparatorias de los trabajos de segmentación y embalaje de la cabeza del reactor y prosiguieron las actividades de desmontaje de otros componentes y elementos del circuito primario.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nº de inspecciones del CSN | 8 |
|----------------------------|---|

**Juzbado**

|            |            |
|------------|------------|
| Nº sucesos | 2 (INES 0) |
|------------|------------|

**Actividades**

Durante el periodo no se produjeron actividades significativas.

La fábrica permaneció en el modo de operación por parada vacacional del 3 al 19 de agosto. En esta fecha se realizaron modificaciones derivadas de las pruebas de resistencia. Desde el 21 de diciembre hasta final de año también permaneció en parada por vacaciones.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nº de inspecciones del CSN | 7 |
|----------------------------|---|

**Instalaciones radiactivas**

Resoluciones adoptadas sobre instalaciones radiactivas (científicas, médicas, agrícolas, comerciales e industriales) del 1 de junio al 30 de noviembre de 2013:

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Informes para autorización de nuevas instalaciones                                                                        | 35  |
| Informes para autorización de modificación de instalaciones                                                               | 120 |
| Informes para declaración de clausura                                                                                     | 25  |
| Informes para autorización de servicios de protección radiológica                                                         | 1   |
| Informes para autorización de unidades técnicas de protección radiológica                                                 | 0   |
| Informes para autorización de servicios de dosimetría personal                                                            | 0   |
| Informes para autorización de retirada de material radiactivo no autorizado                                               | 8   |
| Informes para autorizaciones de empresas de venta y asistencia técnica de equipos de rayos X para radiodiagnóstico médico | 8   |
| Informes para autorización de otras actividades reguladas                                                                 | 3   |
| Informes relativos a la aprobación de tipo de aparatos radiactivos                                                        | 4   |
| Informes relativos a homologación de cursos para la obtención de licencias o acreditaciones                               | 29  |

Acciones coercitivas adoptadas sobre instalaciones radiactivas (científicas, médicas, agrícolas, comerciales e industriales) del 1 de junio al 30 de noviembre de 2013:

|                                                                         |   |
|-------------------------------------------------------------------------|---|
| Apercibimientos a instalaciones radiactivas industriales                | 9 |
| Apercibimientos a instalaciones radiactivas de investigación o docencia | 0 |
| Apercibimientos a instalaciones radiactivas médicas                     | 3 |
| Apercibimientos a unidades técnicas de protección radiológica           | 2 |
| Apercibimientos a servicios de protección radiológica                   | 0 |
| Apercibimientos a instalaciones de rayos x médicos                      | 1 |
| Apercibimientos a otras actividades reguladas                           | 1 |

## Seguridad física

### Actividades más relevantes

Continuaron los trabajos del Grupo de Asuntos Nucleares en la preparación de la Conferencia Internacional de Seguridad Física del OIEA, la Iniciativa Global para combatir el terrorismo nuclear y la Cumbre de Seguridad Física Nuclear que se celebrará en marzo de 2014 en La Haya. También continuó la colaboración con la Secretaría de Estado de Seguridad en Amenaza Base de Diseño, modelo de respuesta en centrales nucleares de potencia y procesos de determinación de probidad del personal con acceso autorizado a materiales e instalaciones nucleares, y formación y entrenamiento de los vigilantes de seguridad de las centrales nucleares mediante la realización de ejercicios de actuación frente a intrusiones de colectivos activistas.

### Cursos

Asistencia de técnicos del CSN al seminario específico sobre Tácticas y Técnicas de Grupos Terroristas, organizado por la Dirección General de la Guardia Civil en Madrid, Valdemoro y Logroño, y al curso organizado por el OIEA en Karlsruhe sobre la implantación práctica del documento sobre recomendaciones de protección física de materiales e instalaciones nucleares.

|                                                     |   |
|-----------------------------------------------------|---|
| Simulacros                                          | 0 |
| Nº de Inspecciones (Vandellós II, Trillo y Almaraz) | 3 |

### Actividades internacionales

El CSN participó en la Conferencia Internacional sobre Seguridad Física organizada por el OIEA en julio de 2013; en la reunión extraordinaria de la Asociación de Reguladores Europeos en Seguridad Física Nuclear (ENSRA), en la reunión anual de esta asociación, celebrada en la sede del CSN, donde se presentó la versión final de los nuevos términos de referencia de la asociación para su aprobación; en la misión IPPAS (International Physical Protection Advisory Service) en EEUU, dirigida por el OIEA que se celebrará en octubre de 2014; y en el primer seminario internacional sobre misiones IPPA, cuyo objetivo es evaluar la protección física de los países miembros.

## Notificación de sucesos

|                                                                   |                   |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Nº incidentes en instalaciones nucleares notificables en 1 hora   | 9                 |
| Nº incidentes en instalaciones nucleares notificables en 24 horas | 19                |
| Nº incidentes radiológicos                                        | 10                |
| Hechos relevantes                                                 | Ninguno reseñable |

## Emergencias

### Activación de la ORE

Durante este periodo no se ha activado la Organización de Respuesta ante Emergencias del CSN.

### Otras actividades relevantes

Finalizó la actividad del Grupo de Trabajo CSN-UME-Unesa sobre entrenamiento de la UME para su posible intervención en el interior de las centrales nucleares españolas en situaciones de emergencia de gravedad extrema.

El CSN participó en las jornadas técnicas y tácticas TEDAX-NRBQ del Cuerpo Nacional de Policía, con ponencias sobre emergencias y seguridad física. También participó en el simulacro general del Penca (ejercicio internacional CURIEX), con 52 técnicos, repartidos por los distintos escenarios. El CSN realizó el seguimiento y análisis de la situación radiológica del accidente para recomendar las medidas de protección a la población, y coordinó los medios radiológicos internacionales desplegados.

Por último, participó en el ejercicio internacional ConvEx-3, organizado por el OIEA, en el que se simuló la detonación de una bomba sucia en el puerto de Tánger y posteriormente otra en la ciudad de Marrakech, se activaron las alarmas en la estación de la Red de Alerta a la Radiactividad (RAR) de Ceuta.



# www.csn.es

OIEA



## Pruebas de resistencia post-Fukushima

Toda la información sobre las pruebas de resistencia llevadas a cabo en las centrales nucleares españolas como consecuencia del accidente de Fukushima, incluyendo el informe preliminar, el informe definitivo, las instrucciones técnicas de seguridad emitidas por el CSN, las notas de prensa y las memorias explicativas.

[http://www.csn.es/index.php/es/?option=com\\_content&view=article&id=18345&Itemid=760%E3%80%88=es](http://www.csn.es/index.php/es/?option=com_content&view=article&id=18345&Itemid=760%E3%80%88=es)



CN TRILLO



## Cómo funciona una central nuclear

Dentro de la información de carácter divulgativo que ofrece la sección Canal Saber de la web del Consejo se incluye una descripción suficientemente completa, pero comprensible, del funcionamiento de las centrales nucleares.

<http://www.csn.es/index.php/es/temas/centrales-nucleares>



## SISC

Los resultados más recientes del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC) se pueden encontrar en: <http://www.csn.es/sisc/index.do>



## Actas del Pleno del CSN

Para consultar las actas del Pleno del CSN, visite: [http://www.csn.es/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=49&Itemid=74&lang=es](http://www.csn.es/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=49&Itemid=74&lang=es)



## Alfa

Puede acceder a los anteriores números de *Alfa*, revista de seguridad nuclear y protección radiológica en: [http://www.csn.es/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=72&Itemid=157&lang=es](http://www.csn.es/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=72&Itemid=157&lang=es)



# Publicaciones



**La dosimetría de los trabajadores expuestos en España durante el año 2011**  
Estudio sectorial



**Guía de Seguridad 9.4**  
Evaluación de seguridad a largo plazo de los almacenamientos superficiales definitivos de residuos radiactivos de media y baja actividad



**La protección radiológica en la industria, la agricultura, la docencia o la investigación**  
(Reimpresión)



**La protección radiológica en el medio sanitario**  
(Reimpresión)

**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

### 4 Robots to the rescue

Robots have been used for many years now to perform dangerous tasks and to move around in inhospitable environments, but at Fukushima their continuing limitations were made painfully obvious. As a result, the US military research agency is offering two million dollars for a robot capable of using all the types of tools required to intervene effectively in the event of a disaster.

### 21 The living dead

The evolutionary capacity of viruses means that new infectious diseases are continuously emerging. Today we know that we will never be able to eliminate them, but we may be able to limit their effects, treat them with new medicines and prevent them by means of vaccines. X-rays allow us to see them and better study their behaviour.

### 31 A Spanish Edison

A book by the Professor of Nuclear Physics Manuel Lozano Leyva brings to light memories of Mónico Sánchez, a man from La Mancha of humble background who became an electrical engineer and inventor in the United States in the dazzling era of Edison and Tesla. He developed the first portable X-ray machine and returned to Spain as a pioneer of electrical engineering.

### 54 Enresa, long-term technology

Set up in the 1980's to manage radioactive waste, Enresa is now a reference at world level thanks to the El Cabril low and intermediate level waste disposal facility. The company now faces the challenge of having the Centralised Temporary Storage for high level wastes in Villar de Cañas (Cuenca) ready for service before the end of 2017.

### 58 Marine gastritis

The accumulation of carbon dioxide in the atmosphere due to the combustion of fossil resources is not only threatening to alter the climate. The absorption of this gas by seawater is leading to an increasing acidification of the oceans. The latest studies indicate that this might increase by 170% during this century, with dramatic consequences for marine life.

## 18 INSIDE THE CSN

This new section of the journal *Alfa* begins with a look at the Technical Division of Radiological Protection of the Nuclear Safety Council and at how it operates, through the protagonists, the technical staff and employees who carry out their work in this key department of the regulatory body.

## 48 RADIOGRAPHY

Spent fuel storage pools.

## INTERVIEWS

### 28 Yotaro Hatamura, chairman of the Fukushima Accident Investigation Commission

"In Japan there is no independent nuclear regulator and this situation will continue in the future".

### 43 Ramón Núñez Centella, ex director of the National Museum of Science and Technology

"Scientific education in schools is still a major issue that needs to be addressed".

## TECHNICAL ARTICLES

### 9 Defect indications at the Döel 3 and Tihange 2 plants

The defects detected in the vessels of the Döel 3 and Tihange 2 nuclear power plants in Belgium have offered us very important lessons for the improvement of regulatory practices and international collaboration, such as the importance of having available information on the original design of critical components and of reinforcing independent inspection during their manufacturing.

### 36 Protection of the patient during radiotherapy: the risk of secondary cancers due to peripheral radiation

Radiotherapy treatments have secondary effects as a result of peripheral radiation. To date little consideration has been given to this problem when deciding on the best treatment strategy, but now a group of researchers led by the University of Seville has addressed the issue, from basic physics to a clinical solution, and has proposed mechanisms to avoid the problem, or at least reduce it.



# Súmate a los 100.000

Desde su inauguración en 1998, los 100.000 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 100.000.