



# Inspectores residentes, la labor reguladora sobre el terreno

Entrevista a Juan Fuster:  
"Aún no hemos visto  
la verdadera cara del  
bosón de Higgs" **PÁGINA 32**

El ciclo de actividad del  
Sol y sus consecuencias  
en algunas actividades  
humanas **PÁGINA 18**

El problema del *denting*  
en los generadores de  
vapor de las centrales  
nucleares **PÁGINA 24**



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



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

# Una tarea discreta y vigilante

Es, quizá, una de las áreas menos conocidas del CSN. Su vigilante trabajo es discreto y continuo. Dentro del complicado engranaje que supone la supervisión de las centrales nucleares, el trabajo que se lleva a diario en las propias plantas cobra una especial relevancia. Los encargados sobre los que recae esta función son los inspectores residentes, su labor abre este nuevo número de la revista *Alfa*. Se encargan de observar, analizar y supervisar que todos los sistemas de seguridad funcionan correctamente y que las acciones que se desarrollan en la planta son las adecuadas para garantizar la seguridad.

Prestamos también especial atención a una estrella que se formó hace más de 4.000 millones de años y que es el centro de nuestro sistema: el Sol. En su interior, se producen reacciones de fusión en las que los átomos de hidrógeno se transforman en átomos de helio, produciéndose la energía que nos irradia. En Francia están en marcha las obras del ITER, un reactor experimental internacional que, previsiblemente, en 2022 imitará esas reacciones atómicas.

Además, analizamos un espectáculo tan apasionante como preocupante que nos ofrece el Sol: las tormentas solares. También conocidas como eyecciones de

masa coronal, estas ondas hechas de radiaciones y viento solar pueden interferir en los sistemas de comunicación y, al mismo tiempo, convertirse en auroras boreales cuando las capas superiores de la atmósfera terrestre desvían su material hacia los polos.

El físico experimental de partículas Juan Fuster nos explica, en la entrevista de este número, que todavía falta tiempo

*Analizar y supervisar que todos los sistemas de seguridad funcionan correctamente es la labor de los inspectores residentes en las centrales nucleares*

para que conozcamos cuál es la imagen real del bosón de Higgs, tras la celebración, el pasado verano en Valencia, de la 37ª Conferencia Internacional de Física de Altas Energías, aunque cada vez se va aumentando el conocimiento de esta nueva “clase de materia cuya interacción no está asociada a ninguna simetría

interna como todas las demás”, según palabras del propio Fuster.

Otra partícula más conocida, el quark, también ocupa páginas de *Alfa*. Hace medio siglo que su existencia fue propuesta por el premio nobel de física Murray Gell-Mann y, desde entonces, está considerada uno de los constituyentes elementales de la materia conocida. Gell-Mann no es el único galardonado con el Nobel que se menciona en este número, hacemos un repaso a todos aquellos científicos que han obtenido el premio por sus trabajos relacionados con la radiactividad y sus aplicaciones.

En la parte más técnica de *Alfa*, abordamos el proyecto creado por el Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario sobre la planificación de los recursos humanos y materiales necesarios para poder garantizar el correcto funcionamiento de los servicios de protección radiológica en hospitales.

Asimismo, analizamos el *denting*, un fenómeno que ocurre en los generadores de vapor de algunas centrales nucleares, y cuáles son las estrategias, así como los planes de mitigación, que los titulares de las plantas han puesto en marcha para que este efecto no vea comprometido el rendimiento de estos componentes del sistema de producción de vapor. ©

## ALFA

Revista de seguridad nuclear  
y protección radiológica  
Editada por el CSN  
Número 25 / III 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

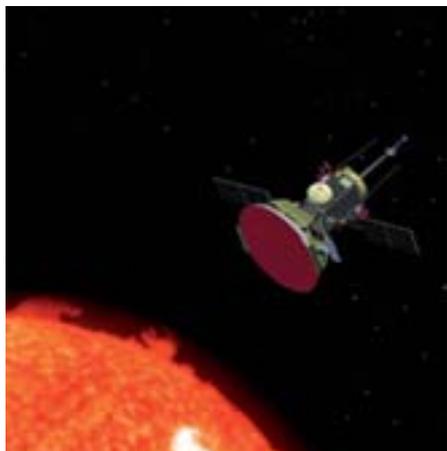
CSN

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



### 18 La atormentada vida del Sol

La actividad solar crece y disminuye en un ciclo de 11 años de duración. En sus momentos de mayor paroxismo arroja un gigantesco flujo de partículas ionizadas que causan las auroras boreales, alteran el clima e interfieren en las telecomunicaciones. Incluso pueden afectar a satélites artificiales y a los sistemas eléctricos.

### 40 La máquina que imitará al Sol emerge de la Tierra

El reactor experimental internacional de fusión nuclear ITER, situado en Cadarache (Francia), acelera su proceso de construcción, tras años de retrasos, para intentar que entre en funcionamiento en 2022 y demostrar que la fusión nuclear puede ser una fuente de energía limpia e inagotable. Su coste previsto se eleva ya a 15.000 millones de euros.



### 48 Del núcleo atómico al Universo

Nacida en la época de la construcción de centrales nucleares en España, la empresa de ingeniería Empresarios Agrupados se abrió a nuevos mercados, pasando de la fisión a la fusión y haciéndose un hueco incluso en otros ámbitos como el de los telescopios y el de la industria espacial.

### 54 Los Premios Nobel de la radiación

Los fenómenos relacionados con la radiación y la radiactividad han sido protagonistas destacados en la historia del Premio Nobel, que es como decir en la historia de la ciencia de los siglos XX y XXI. Solo los rayos X y sus aplicaciones han merecido 28 galardones. Sin embargo, los expertos consideran que la edad dorada de los grandes descubrimientos en este ámbito ha quedado ya atrás.



### 59 Una hipótesis descabellada... pero cierta

En 1964, Murray Gell-Mann propuso la existencia de unas partículas elementales, a las que denominó quarks, que, junto a los leptones, explican la materia conocida y son hoy, 50 años después, un pilar esencial del modelo estándar, la construcción físico-matemática que explica la estructura íntima de la materia, exhaustivamente validada por numerosos experimentos.

## EL CSN POR DENTRO

### 4 Inspectores residentes, la labor reguladora sobre el terreno

Dentro del complicado engranaje que supone la supervisión de las centrales nucleares, resulta esencial el trabajo que realizan *in situ* los inspectores residentes, 13 técnicos que son “los ojos y los oídos del CSN en el terreno”.

### 38 RADIOGRAFÍA

Bloqueo del tiroides con yodo estable.

### ENTREVISTA

### 32 Juan Fuster Verdú, copresidente de la ICHEP 2014

“Aún no hemos visto la verdadera cara del bosón de Higgs”.

### ARTÍCULOS TÉCNICOS

### 12 Servicios de protección radiológica: cómo dimensionar los recursos humanos y materiales

El Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario ha constituido un grupo de trabajo para elaborar un documento técnico recomendatorio que ayude a planificar y evaluar los recursos de los servicios de protección radiológica.

### 24 *Denting* en los generadores de vapor

Los generadores de vapor instalados en las centrales de Ascó y Almaraz en los noventa presentan una degradación denominada *denting* y que está asociada, probablemente, a la acumulación de lodos e impurezas del sistema secundario. Por ello están aplicando estrategias para mantener un adecuado nivel de seguridad en las plantas.



45	Reacción en cadena
65	Panorama
67	Acuerdos del Pleno
68	El CSN informa
71	csn.es
72	Publicaciones



# Inspectores residentes, la labor reguladora sobre el terreno

Inspectores residentes revisando las alarmas de un panel de la sala de control.

¿Cómo se mantiene la seguridad en cada una de las centrales españolas? ¿Puede el Consejo de Seguridad Nuclear estar en todas las instalaciones a la vez? ¿Quiénes son las personas responsables de analizar, investigar e inspeccionar el parque nuclear español sobre el terreno cada día?

Garantizar la seguridad nuclear y la protección radiológica de la población, los trabajadores y el medio ambiente son las principales razones para las que se creó el Consejo de Seguridad Nuclear. Llevar a cabo tan alta misión requiere contar con grandes especialistas que vigilen continuamente el estado de las instalaciones y persigan el correcto cumplimiento de los requisitos de seguridad establecidos.

Dentro del complicado engranaje que supone la supervisión de las centrales nucleares, el trabajo que se lleva a diario en las propias plantas cobra una especial relevancia. Los encargados sobre los que recae esta función son los inspectores residentes. Dicen de ellos que son “los ojos y los oídos del CSN en el terreno”. Estos 13 miembros del cuerpo técnico del organismo regulador se encargan de realizar un seguimiento y una supervisión diaria y directa de las actividades que se desarrollan en cada instalación y de trasladar la información a la sede central del Consejo de Seguridad Nuclear.

■ Texto: **Vanesa Lorenzo López y Adriana Scialdone García** | Área de Comunicación del CSN ■

Los inspectores residentes forman parte del Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN. A diferencia del resto de los miembros del organismo regulador, que desempeñan su actividad laboral en la propia sede, los residentes trabajan a diario en las plantas. España cuenta con un inspector residente y un adjunto en cada emplazamiento, salvo en el caso de Santa María de Garoña y José Cabrera que, por sus situaciones (una parada y otra en desmantelamiento), solo cuentan con uno.

La Inspección Residente (INRE) realiza uno de los trabajos más variados dentro del Consejo. Se encarga de observar, analizar y supervisar que todos los sistemas de seguridad funcionan correctamente y que las acciones que se desarrollan en la planta son las adecuadas, conforme a las normas y procedimientos, para garantizar la seguridad. Hemos querido acercarnos al día a día del equipo de residentes para comprender el complejo trabajo que llevan a cabo.

La jornada comienza en torno a las 7:00 horas de la mañana. La primera tarea al llegar a la instalación es conocer el estado de la planta e informarse de todo lo que ha sucedido desde que finalizó su trabajo el día anterior. Tras consultar el diario de operación ubicado en la sala de control y las órdenes de trabajo, el residente se reúne con la dirección de la central para intercambiar información sobre los temas del día, incluyendo las incidencias que se hayan producido en su ausencia, las labores de mantenimiento que se estén llevando a cabo, las pruebas de vigilancia de los sistemas de seguridad u otras tareas que se hayan planificado.

Puestos al día, entre las 08:45 y las 9:45 horas cada inspector recibe una llamada desde la sede del CSN. Es el turno de informar al coordinador y a los inspectores de apoyo del área de las incidencias más significativas que hayan tenido



Activando el dosímetro para acceder a zona controlada.

lugar en la central durante su ausencia. A su vez el personal de la sede transmite el estado de la planta al resto de la organización del Consejo. El intercambio de información entre la planta, la INRE y el CSN es uno de los puntos vitales en este trabajo.

Una vez finalizada la llamada diaria, el residente acude a la sala de control, lugar desde el que se manejan todos los equipos relevantes de manera remota. Allí recopila información de la situación actual de la planta y verifica los estados de los sistemas importantes para la seguridad. El jefe de turno y el personal de la sala le comunican las actividades que se están desarrollando y cuáles están programadas para ese día: “Depende mucho de lo que tengamos programado y de lo que haya sucedido en la central para decidir lo que vamos a inspeccionar ese día”, nos cuenta uno de ellos.

Conocido el estado de la instalación y los trabajos previstos, el residente determina qué elementos revisar basándose en la información recibida y conforme

a la periodicidad de los procedimientos de inspección del CSN. Estos documentos recogen la necesidad de, entre otros asuntos, realizar rondas de control por las áreas que contienen equipos importantes para la seguridad o con riesgos radiológicos significativos, asistir a trabajos de mantenimiento, así como a las pruebas que se llevan a cabo para verificar su correcto funcionamiento. “El hecho de que podamos asistir como uno más a las reuniones que se mantienen en la planta y a las comprobaciones de los sistemas muestra un alto grado de transparencia” por parte del personal de las centrales nucleares.

En las rondas por la planta se incluye la visita a la zona controlada: “Debemos ir dos veces por semana, como mínimo”. Dado que en este área se concentran los mayores riesgos radiológicos, incluyendo la irradiación y la contaminación, se deben tomar las medidas de protección radiológica estipuladas. Un inspector detalla el vestuario necesario para acceder a ella: “Unos zapatos especiales que nos proporcionan en los vestuarios, un buzo de

## “El trabajo de la Inspección Residente es clave para el cumplimiento de las funciones que el organismo regulador tiene encomendadas”

Ingeniero Industrial en la especialidad de Técnicas Energéticas, César Gervás es el responsable del Área de Coordinación y Apoyo de la Inspección Residente. Tras su paso por el Departamento de Seguridad de Empresarios Agrupados para las centrales de Trillo y Ascó, en 1993 ingresó en el Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN.

Poco tiempo después de llegar al organismo regulador, Gervás se trasladó a la central nuclear de Almaraz para desempeñar el papel de inspector residente durante 11 años. A su regreso a la sede del CSN en Madrid, se incorporó en la Subdirección de Instalaciones Nucleares como consejero técnico y desde 2009 desempeña el puesto de coordinador de la Inspección Residente en las centrales nucleares en operación.

**PREGUNTA:** Conoce de cerca a todos los inspectores residentes, incluso usted ha sido uno de ellos, ¿Cuál cree que es la principal motivación que les lleva a decidir trabajar en las propias instalaciones nucleares?

**RESPUESTA:** Siempre hay excepciones, pero dejando al margen las particularidades de algún caso especial, la experiencia me dice que la decisión de formar parte del equipo de inspectores residentes radica en motivos básicamente laborales. El hecho de poder realizar un trabajo muy variado es un aliciente, tenga en cuenta que los procedimientos que constituyen el Plan Base de Inspección nos permiten supervisar prácticamente todas las actividades que se llevan a cabo dentro de una central. Otro de los factores que a mi parecer es determinante es el hecho de que la mayoría del trabajo diario se realiza en contacto directo con la “realidad de la planta”.

**P:** Dentro del complejo engranaje que supone la supervisión de las centrales nucleares, ¿qué papel tienen los inspectores residentes?

**R:** Me atrevería a decir que el papel de la Inspección Residente es clave para el cumplimiento de las funciones que el organismo regulador tiene encomendadas. Entre otras tareas, el CSN debe vigilar de cerca el funcionamiento de las instalaciones y para esto el trabajo de los residentes es indispensable.

Su día a día transcurre en las propias plantas, por tanto ellos son nuestra fuente más directa de información. Esto nos permite tener siempre una idea general del estado de la planta y tomar las decisiones pertinentes dependiendo de cada situación.

La principal función de este equipo de inspectores es observar, analizar y, según los criterios establecidos por el Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC), calificar los incidentes que ocurren en las instalaciones para su posterior clasificación en relación con la seguridad. A este respecto, cabe destacar que aproximadamente un 60 % del total de los hallazgos de inspección encontrados por el CSN en un año han sido detectados por los residentes.

Me gustaría además resaltar otra de las grandes funciones que desempeñan en el caso de que se produzca una emergencia en una central nuclear. Ante esta situación, son nombrados jefes del Grupo Radiológico y ello supone que en algunas

*Su elevada cualificación técnica hace que su opinión sea profundamente valorada y respetada*

ocasiones tendrían la gran responsabilidad de recomendar a las autoridades pertinentes el establecimiento de las medidas necesarias para la protección radiológica de la población.

Como verán, ser inspector residente no es una tarea fácil, implica estar atento las 24 horas del día a lo que pasa en la central y cumplir con un papel que exige la máxima atención y una gran responsabilidad.

**P:** Metafóricamente hablando, podríamos decir que los residentes son los ojos del CSN dentro de las centrales. ¿Cómo se traslada a la sede en Madrid la información de todo lo que está ocurriendo cada día en las plantas?

**R:** Como he mencionado anteriormente, son ellos los que están cada día en las centrales y los que viven en primera



El coordinador del Área, César Gervás (izquierda) junto con el inspector residente de apoyo, Rubén Martínez.

persona todo lo que está sucediendo. El flujo de información entre la Inspección Residente y la Dirección Técnica en Madrid es muy importante

Todos los días, a primera hora de la mañana, llamo a los inspectores de cada central para conocer el estado de las plantas. Durante esta “reunión telefónica”, en la que también participan otros miembros del área, se nos trasladan las incidencias más significativas que han tenido lugar. Tras esta conversación, aquí celebramos una reunión en la que se informa al resto de las áreas del organismo sobre el estado de las plantas.

Además de esta rutina diaria, cualquier incidencia, consulta o asunto de interés que pueda surgir es trasladado de manera inmediata. Gracias a la telefonía móvil nuestra conexión con las plantas es permanente.

Además, semanalmente celebramos junto con el director técnico de Seguridad Nuclear y los subdirectores de Instalaciones Nucleares, Ingeniería y Tecnología Nuclear un comité de gestión para analizar las incidencias más importantes que han ocurrido en el parque nuclear español.

Los residentes envían también todos los viernes un informe en el que recogen los hechos más relevantes acontecidos en la instalación durante la semana y, adicionalmente, cada trimestre recibimos un acta de inspección en el que detallan todos los aspectos que han detectado a lo largo

de esos tres meses. Algunos de estos asuntos serán susceptibles de ser incluidos en el Sistema Integrado de Supervisión de Centrales como *hallazgos de inspección*.

**P: ¿Cómo se gestiona a un equipo cuyo trabajo diario implica una gran presión y un alto grado de responsabilidad?**

Con una gestión basada en la confianza. Esta confianza hace posible que las decisiones diarias sobre qué deben revisar, cuándo y dónde, sean tomadas prácticamente por los propios residentes. Su proximidad al “lugar de los hechos” y su elevada cualificación técnica, hacen que su opinión sea profundamente valorada y respetada dentro del área a la hora de tomar decisiones sobre qué se debe inspeccionar o sobre las causas de un determinado suceso y su valoración.

Con el objetivo de optimizar y homogenizar tanto el proceso de inspección realizada por los residentes como el proceso de comunicación establecido entre ellos y los titulares de las instalaciones, está establecido que yo visite periódicamente las centrales para observar directamente el desarrollo de ambos procesos. Esta supervisión por cargos superiores, sin ser obligatoria, considero que es necesaria. Sin embargo, por sí misma no sería efectiva si no existiera una elevada confianza en el equipo de inspectores.



Control de las tasas de radiación en las proximidades del motor de la bomba del sistema de aspersión del núcleo a baja presión.



Supervisión del estado de la instrumentación local.

algodón que es como un mono de trabajo, el casco, unos guantes de algodón y unas gafas para proteger los ojos.” Además,

un vestuario adicional: “un cubrecabezas que es como una capucha, el Tyvek que es una especie de mono impermeable

si se inspeccionan lugares en los que puede haber vapores, humedad o líquidos potencialmente radiactivos, tendrán que llevar

que cubre todo el cuerpo y unos guantes de látex”.

Los inspectores, al igual que cualquier otro trabajador profesionalmente expuestos a la radiación, tienen un límite de dosis que pueden recibir al año de 50 miliSievert (mSv), con un máximo de 100 mSv en cinco años. No obstante, en su día a día están muy lejos de alcanzarlo: “La dosis recomendada no se suele

## La Inspección Residente en centrales nucleares en desmantelamiento

La inspección y el control que el CSN mantiene sobre una central nuclear en fase de desmantelamiento, como es José Cabrera, es equiparable al existente en el resto de las instalaciones en fase de operación. Si bien, sus actividades rutinarias difieren debido al carácter particular y novedoso de los trabajos que se llevan a cabo en la planta.

Debemos tener en cuenta que el desmantelamiento es un proceso dinámico en el que se van realizando actividades de carácter generalmente irreversible que desembocarán en la desaparición total de la instalación.

Al igual que en las anteriores fases de la vida de la central, el CSN mantiene a su inspección residente, que será la encargada de realizar tanto el seguimiento *in situ*, como la supervisión continua de las actividades relacionadas con el desarrollo del Proyecto de Desmantelamiento y Clausura (PDC).

Por las peculiaridades que esta etapa de la vida de la central presenta, el organismo regulador ha desarrollado

el “Manual de la Inspección Residente del CSN en las centrales nucleares en desmantelamiento”, donde se describen tanto las funciones, objetivos y actividades a llevar a cabo por el inspector, como los aspectos técnicos y organizativos relacionados con el desarrollo de su labor.

Fuera de las actividades de inspección propiamente dichas, el residente vigila de cerca cada día las actividades de desmantelamiento e informa a sus responsables sobre los resultados. El conocimiento de las actividades realizadas, del estado de la instalación en cada momento y de las previsiones futuras son aspectos importantes para determinar cómo seleccionar e implementar el programa de inspección apropiado a las circunstancias cambiantes de la planta.

En relación al desarrollo del Plan de Desmantelamiento y Clausura, existen diversas tareas que el residente deberá tener en cuenta en la planificación de su programa de



Medición de la tasa de radiación en la cavidad de recarga en Almaraz.

sobrepasar, ya que al entrar en ciertas áreas de la central, como puede ser la zona controlada, llevamos nuestro dosímetro personal de lectura directa que nos va indicando las dosis que recibimos a diario y, a su vez, esta información se registra en nuestro expediente personal”.

Dada la relevancia de este aspecto, además de estar vigilado a través de los dosímetros de lectura directa también

importante es planificarte bien antes de entrar a zonas con radiactividad y así poder hacer el recorrido de la manera más eficaz y rápida posible”.

Otras de las tareas que llevan a cabo es la revisión diaria del Programa de Acciones Correctivas (PAC), la base de datos de la central en la que se registran las actividades o propuestas de mejora del titular para corregir desde la incidencia

existen una supervisión y un control mensuales a través del dosímetro de termoluminiscencia (TLD). Los inspectores residentes insisten en que “su trabajo es más de mirar que de tocar” y en que hay “múltiples barreras” que impiden que se sobrepasen los límites establecidos: “Lo impor-

más nimia e insignificante hasta las acciones resultantes o requeridas.

Tras finalizar su trabajo en la planta, y con la información recopilada, el día del residente suele terminar en su despacho, realizando un archivo documental de todo aquello que ha observado. Esto les ayudará a elaborar el parte semanal, que recoge las incidencias de la planta, y que se envía al Consejo cada viernes. A su vez, todos los lunes se analiza esta información en un “comité de gestión” integrado por el director técnico de Seguridad Nuclear, los subdirectores de Instalaciones Nucleares, Ingeniería y Tecnología y el coordinador de la INRE.

Trimestralmente se realiza también un acta de inspección que incluye las observaciones y supervisiones realizadas durante ese periodo. Basándose en ella, el residente debe hacer una valoración de los hallazgos identificados que, en función de su importancia para la seguridad, pueden requerir acciones adicionales por parte del organismo regulador. Todo el proceso se encuentra dentro del Plan

inspección. Destacar entre otras: las modificaciones temporales en determinados sistemas para adaptarlos a las diversas fases del desmantelamiento; la segmentación y el desmontaje de equipos para liberación de zonas y edificios; la caracterización radiológica de los materiales para su segregación; la limpieza y descontaminación radiológica de componentes y superficies y, por tanto, la generación de grandes cantidades de materiales residuales que en algunos casos presentan una contaminación radiactiva significativa.

Como consecuencia de estas actividades contempladas en el PDC, y en comparación con la fase de operación, en las tareas rutinarias del inspector residente adquieren una mayor relevancia las actividades relacionadas con la vigilancia y el control radiológico de los trabajos; los aspectos relacionados con la seguridad y la salud laboral, y la gestión de residuos, debido a los factores de riesgo asociados a la ejecución de las actividades de desmantelamiento. ▶



Vigilancia de los contenedores de elementos de combustible gastado.

## El Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC)

En el año 2000, el CSN decidió estudiar las mejores prácticas reguladoras en varios países para mejorar el sistema de inspección y control de las centrales nucleares españolas. Tras analizar diversos modelos, consideró que el sistema estadounidense era la opción más idónea para utilizar en nuestro país. Una vez adaptado, y después de haber incorporado métodos novedosos de supervisión enfocados a la observación del comportamiento de las instalaciones en operación y la valoración de los resultados de las inspecciones, en 2007 quedó implantado el Sistema Integrado de Supervisión de las Centrales (SISC).

El SISC es un conjunto de actividades realizadas con una metodología establecida, que el CSN y los titulares de las centrales nucleares utilizan como herramienta para supervisar el funcionamiento de las centrales y establecer las acciones correctoras necesarias en función de sus resultados. Este modelo facilita la comunicación del estado de las instalaciones, aumentando así la transparencia de la información que se traslada a la ciudadanía.

Este programa se basa en aplicar un conjunto de 16 indicadores de funcionamiento de las centrales para la observación continua de su comportamiento y la información procedente de los hallazgos del programa de inspecciones del CSN. Esta información se codifica con un código de colores para facilitar la comprensión general de los resultados, en función de la importancia para la seguridad: muy baja (*verde*), entre baja y moderada (*blanco*), sustancial (*amarillo*) y alta (*rojo*).

Dentro de esta metodología, la función del equipo de residentes es fundamentalmente inspectora. El programa de inspecciones consiste en observaciones, medidas, exámenes o pruebas directas, con el fin de evaluar el estado de las estructuras, sistemas, componentes y materiales, así como actividades de operación, procesos, procedimientos y competencia del personal, mediante las cuales se comprueba el cumplimiento de normas, buenas prácticas o compromisos documentados y, por lo tanto, que la central opere de forma segura. Los incumplimientos se categorizan según su importancia para la seguridad, de acuerdo con los procedimientos aplicables de determinación de la importancia de los hallazgos.

Los indicadores de funcionamiento se definen para caracterizar el funcionamiento de la central mediante datos numéricos y se aplican a todos aquellos aspectos de la seguridad razonablemente susceptibles de ser cuantificados, para lograr la máxima objetividad. Los resultados de los indicadores se clasifican en rangos de importancia preestablecidos, equivalentes a los de los hallazgos de inspección.

Además de los indicadores de funcionamiento y del Programa de Inspecciones también se tienen en cuenta de manera complementaria otras fuentes de información, ya sean generadas por los titulares o por el propio CSN, en el contexto de su labor general de seguimiento, evaluación, control e inspección de las centrales y, en general, cualquier tipo de información que pueda aportar algún hallazgo relevante en relación con el funcionamiento y la seguridad de las centrales nucleares. 

Base de Inspección del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC): “Este programa ha ayudado a sistematizar el trabajo del inspector residente, sentando nuevos estándares y procedimientos que nos sirven como guía”.

Cabe destacar también la importante labor que desempeñan ante un incidente que el titular debe notificar al CSN, dado que ellos se encargan de redactar un informe en el que se aportan datos adicionales e independientes a los comunicados por el titular.

### Área de la Inspección Residente

Todo el trabajo hasta ahora descrito está supervisado desde la sede del organismo regulador, en concreto desde el Área de la Inspección Residente, que está integrada en la Subdirección de Instalaciones Nucleares. La INRE dispone en Madrid de un coordinador, César Gervás, quien dirige su funcionamiento y supervisa sus actuaciones. Asimismo, el área cuenta con un consejero técnico que los asesora y dos inspectores residentes de apoyo para dar soporte al personal de la planta.

Para formar parte del equipo de residentes es necesario haber aprobado la oposición con la que se accede al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del CSN pero, a diferencia de otros puestos que requieren estar especializados en un tema, el residente abarca muchas materias más y las circunstancias le obligan a seguir ampliando sus conocimientos a través de distintos cursos teóricos y de su experiencia en las centrales: “Hay mucha variedad, tenemos que saber un poco de todo y por esta razón nunca dejamos de aprender, es lo interesante de este trabajo”, asegura uno de ellos.

Otro aspecto que se ha de destacar de la INRE es el de su movilidad; los inspectores no pueden desempeñar su función más allá de diez años en cada instalación, y, por este motivo, la mayoría ha traba-



Comprobación del funcionamiento del ventilador de la torre de refrigeración de los generadores diesel de emergencia.

jado en varias centrales. Esta condición fue adoptada por el regulador estadounidense con el objetivo de que los inspectores realicen su trabajo con total independencia, sin llegar a establecer una relación personal con los trabajadores de la propia planta: “Es bueno que vean que estás ahí para ayudar y con el mismo objetivo que todos, que la central funcione adecuadamente, pero no puedes ser uno más”.

### En emergencias

El trabajo de un inspector residente no solo se centra en la supervisión de las plantas, pues en caso de una emergencia nuclear real o simulada, asume el cargo de jefe del Grupo Radiológico y desempeña las funciones previstas en el Plan de Emergencia Nuclear de la provincia donde se ubica la central. (En España estos planes se conocen con los nombres de Penbu, Penta, Penva, Pengu y Penca, correspondientes a Burgos, Tarragona, Valencia, Guadalajara y Cáceres, respectivamente).

Ante esta situación, la Subdirección de Emergencias y Protección Física del

CSN facilita a los jefes del Grupo Radiológico el apoyo, los medios humanos y materiales necesarios para que puedan desempeñar sus funciones. Los inspectores dependen jerárquica y funcionalmente del director del Plan de Emergencia Nuclear de la provincia afectada por la emergencia, es decir, el delegado o subdelegado del Gobierno en dicha provincia.

El inspector residente es el encargado de comunicar a la Subdelegación, de acuerdo con las directrices y procedimientos del Consejo de Seguridad Nuclear, la información pertinente sobre aspectos de seguridad nuclear y protección radiológica que les sean solicitados por ésta para su difusión a las autoridades y agentes locales.

Dentro del proceso de respuesta a emergencias nucleares, el jefe del Grupo Radiológico se desplaza al Centro de Coordinación Operativa (CECOP) de la provincia afectada (generalmente situado en la Delegación o Subdelegación del Gobierno en la provincia), mientras que el otro integrante de la Inspección Resi-

dente acudirá a la central y desarrollará las tareas que específicamente le sean asignadas desde la Sala de Emergencias del CSN.

Desde el CECOP, y teniendo en cuenta las recomendaciones del CSN, el residente asesora al director del plan sobre el estado de la central accidentada y las medidas radiológicas que se deben adoptar para proteger a la población y al personal de intervención. Adicionalmente, gestiona los medios humanos y materiales que el CSN enviará a la provincia afectada para conseguir que dichas medidas sean efectivas.

Ser inspector requiere una gran responsabilidad, estamos ante profesionales que tienen en sus manos el acceso a toda una central para observar, analizar e informar de todo aquello que sucede en cada rincón de estas instalaciones. El día a día de la Inspección Residente es una pieza clave en el amplio engranaje de la seguridad nuclear. El resultado final de este conjunto de actividades es un trabajo de 24 horas en el que se vela por la seguridad de todos. ©

# Cómo dimensionar los recursos humanos y materiales: un proyecto del Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario

Los servicios de protección radiológica son entidades altamente especializadas, creadas para asegurar y garantizar la correcta aplicación del sistema de protección radiológica en las instalaciones donde llevan a cabo su función. Las decisiones en cuanto al dimensionado de los medios humanos y técnicos de estos servicios constituyen un desafío, puesto que están condicionadas, en la mayoría de los casos, por factores difícilmente objetivables. El Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario, consciente de esta

problemática, decidió constituir un grupo de trabajo que abordase esta temática y elaborase un documento técnico, de carácter recomendatorio, que pudiera servir de referencia o consulta a la hora de planificar o evaluar los recursos de dichos servicios. ■ Texto: **M<sup>a</sup> Dolores Rueda Guerrero\***, **Isabel Sierra Perler\*** y **Pilar Lorenz Pérez\*\*** | Subdirección de Protección Radiológica Operacional del Consejo de Seguridad Nuclear. \*Área de Servicios Técnicos en Protección Radiológica. \*\*Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas. ■



Equipo de Tomografía Computarizada.

**E**n España, la protección radiológica está soportada por la pirámide normativa. La legislación prevé la existencia de entidades especializadas que realizan funciones de protección radiológica en las instalaciones radiactivas y que asesoran a sus titulares.

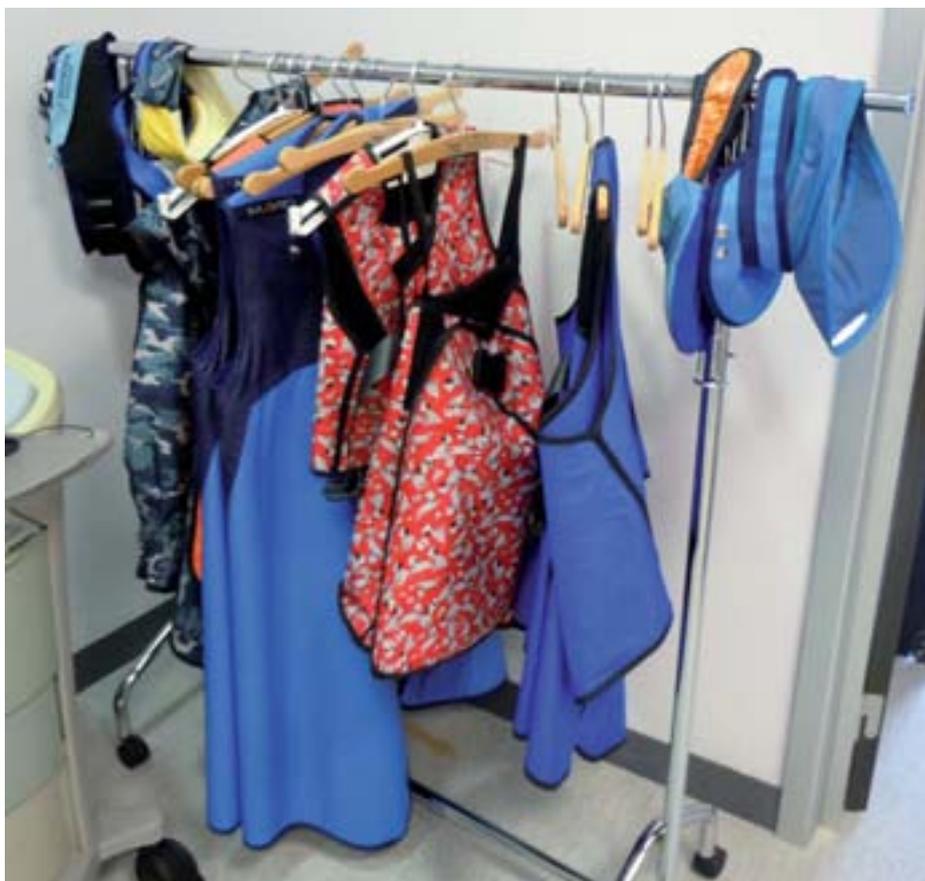
El Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (Real Decreto 783/2001, de 6 de julio) establece, en su artículo 23, que el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), considerando el riesgo radiológico, podrá exigir a los titulares de las prácticas que se doten de un servicio de protección radiológica (SPR) o que contraten una unidad técnica de protección radiológica (UTPR), para que les proporcionen asesoramiento específico en protección radiológica y encomendarles las funciones. Además, dichos servicios y unidades

técnicas deberán ser expresamente autorizados por el CSN y estarán constituidos por el jefe de servicio o unidad técnica y por técnicos expertos en protección radiológica.

Por otra parte, el Real Decreto 1085/2009, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalación y Utilización de Aparatos de Rayos X, en su artículo 26 dispone que el CSN, a la vista de los informes de actividad de los SPR y UTPR, podrá solicitar una justificación de la suficiencia de la dotación de personal técnico y, en su caso, una propuesta para su actualización.

Las decisiones en cuanto al dimensionado de los medios humanos y técnicos de los SPR constituyen un reto, puesto que están condicionadas por factores difícilmente objetivables. En este contexto, la mayoría de los informes y recomendaciones, tanto nacionales como internacionales, están obsoletos o se encuentran incluidos en recomendaciones más generales, y no se dispone de un documento, recomendatorio o prescriptivo, que indique el personal y los medios mínimos necesarios para que un SPR pueda llevar a cabo, de modo eficiente, las funciones que se le atribuyen para garantizar el cumplimiento de la normativa de protección radiológica.

A la vista de la experiencia acumulada en el CSN en materia de autorización y control de los SPR del ámbito sanitario, y teniendo en cuenta la aparición de nuevas técnicas relacionadas con los usos médicos de las radiaciones ionizantes, que conllevan un aumento considerable de la complejidad y del número de elementos que debe controlar el personal de estos servicios, se estimó la necesidad de establecer unas bases desde el punto de vista técnico, que sirvieran de referencia a la hora de planificar los recursos de los SPR y valorar su idoneidad para garantizar su correcto funcionamiento.



Prendas utilizadas para protección radiológica.

Por ello, en el contexto del Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario (en adelante, Foro), formado por el CSN y las sociedades españolas de Física Médica (SEFM) y Protección Radiológica (SEPR), se decidió crear un grupo de trabajo para abordar esta temática y elaborar un documento sobre los medios mínimos, tanto humanos como técnicos, necesarios en los SPR.

A propuesta de ambas sociedades científicas y del CSN, el grupo de trabajo quedó constituido por Diego Burgos (Hospital San Cecilio de Granada), en calidad de coordinador, Manuel Alonso (Hospital Marqués de Valdecilla de Santander), José Luis Carrasco (Hospital Virgen de la Victoria de Málaga), M<sup>a</sup> Ángeles García (Hospital Araba de Vitoria-Gasteiz), Miguel Ángel Peinado (Hospital Central de Asturias, Oviedo), y Pilar Lorenz, M<sup>a</sup> Dolores Rueda e Isabel Sierra (Consejo de Seguri-

dad Nuclear), con el objetivo de consensuar un documento de amplio alcance y de carácter recomendatorio, que pudiera servir de referencia o consulta a cualquier persona o institución implicada en la planificación y gestión de los SPR del ámbito sanitario.

Para la elaboración del documento *Medios humanos y materiales mínimos necesarios en los servicios de radiofísica hospitalaria y protección radiológica* se ha tenido en cuenta la normativa vigente, destacando el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes y los reales decretos de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, Medicina Nuclear y Radioterapia (especialidades que usan las radiaciones ionizantes para el diagnóstico y tratamiento médico de pacientes), así como los correspondientes protocolos españoles de control de calidad.



A la izquierda, detector de radiación. Arriba, fuentes radiactivas utilizadas en el tratamiento por braquiterapia.

Dicho documento fue aprobado por el Foro en su reunión de 14 de mayo de 2014 y se encuentra disponible en las páginas web de la SEPR ([www.sepr.es](http://www.sepr.es)) y de la SEFM ([www.sefm.es](http://www.sefm.es)).

### Funciones

Los SPR son entidades que contribuyen a mejorar la situación de las instalaciones radiactivas en lo que se refiere a la protección radiológica de los trabajadores, del público y del medio ambiente, y constituyen un apoyo para el CSN en el cumplimiento de sus funciones, especialmente en el control del funcionamiento de las instalaciones radiactivas.

Los SPR autorizados en el ámbito sanitario por el CSN son, en la mayoría de los casos, servicios conjuntos de protección radiológica y radiofísica hospitalaria y sus funciones se distribuyen en tres grandes áreas: protección radiológica, dosimetría física y control de calidad del equipamiento y dosimetría clínica.

Es conveniente aclarar que la función específica de protección radiológica está regulada por el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (Real Decreto 783/2001, de 6 de julio) y la radiofísica hospitalaria es

una especialidad sanitaria que tiene su origen en el uso de las radiaciones en medicina, contemplada en el Real Decreto 183/2008, de 8 de febrero, por el que se determinan y clasifican las especialidades en Ciencias de la Salud y se desarrollan determinados aspectos del sistema de formación sanitaria.

Las tareas específicas de protección radiológica son, entre otras:

- Participación en las fases de diseño, autorización y clausura de las instalaciones radiactivas, así como en la adquisición de equipos y material radiactivo
- Evaluación de los riesgos asociados a las instalaciones.
- Clasificación de zonas y trabajadores expuestos.
- Establecimiento de normas de acceso y trabajo en zonas radiológicas.
- Vigilancia de la radiación y contaminación.
- Vigilancia de efluentes y residuos radiactivos.
- Mantenimiento y verificación de los equipos de medida.
- Vigilancia dosimétrica y gestión de la vigilancia médica de los trabajadores expuestos.
- Formación y entrenamiento del personal.

— Optimización de la protección radiológica.

— Control de calidad de las instalaciones médicas.

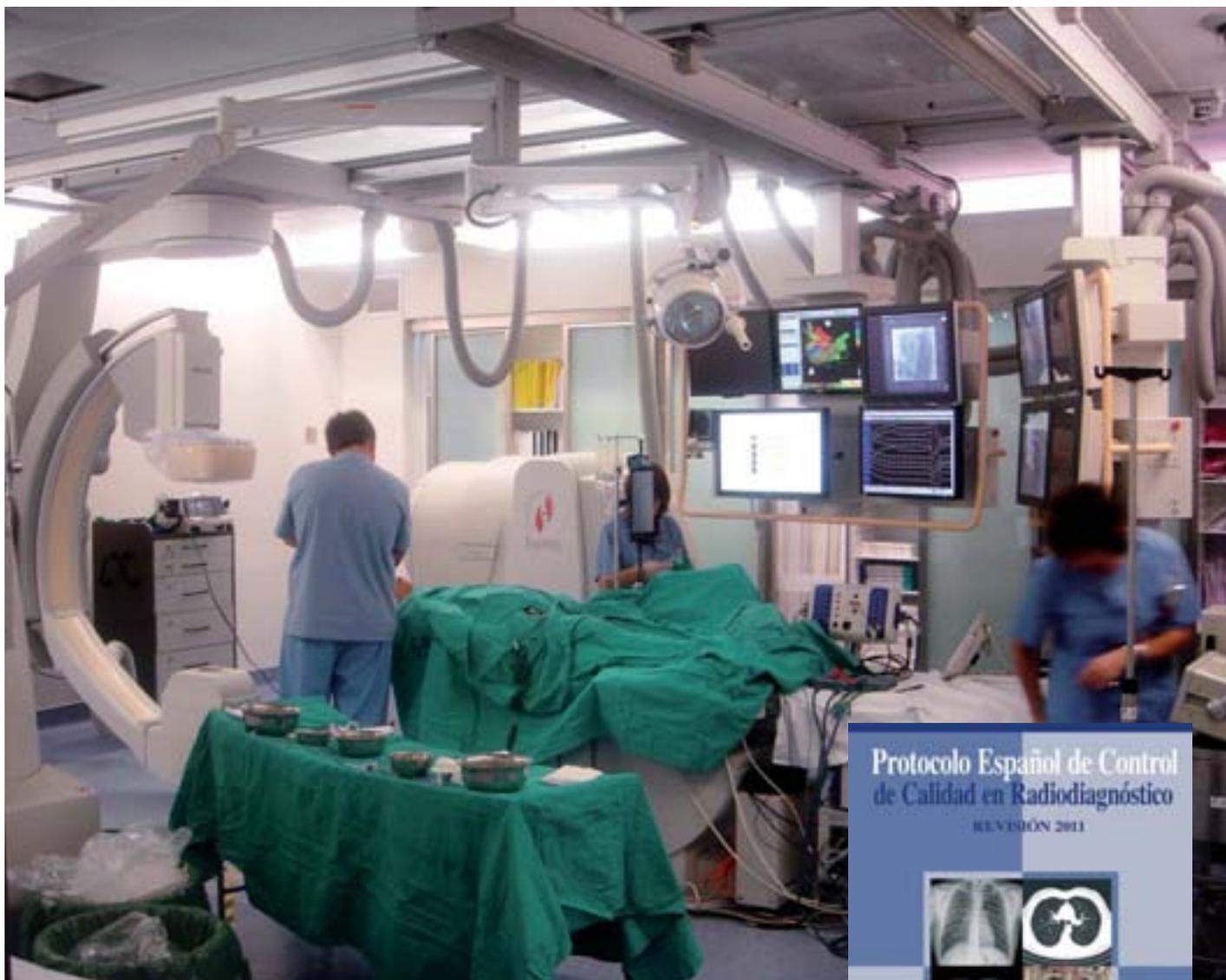
El control de calidad del equipamiento abarca multitud de equipos, que pueden pertenecer a una gran variedad de servicios médicos y quirúrgicos, como radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear, cardiología, digestivo, traumatología, y urología.

La dosimetría clínica afecta fundamentalmente a servicios que administran tratamientos oncológicos (Radioterapia y Medicina Nuclear), aunque puede aplicarse a otros, al calcular dosis impartidas a pacientes en la realización de cualquier tipo de estudio que use radiaciones ionizantes (Radiodiagnóstico o Medicina Nuclear).

Por tanto, para hacerlo aplicable a la situación actual de los SPR del ámbito sanitario, el documento aprobado abarca aspectos relativos a protección radiológica y radiofísica hospitalaria.

### Medios humanos

Para la determinación de los medios humanos mínimos necesarios, se han tenido en cuenta las funciones que afectan al



Sala de radiología intervencionista.

personal facultativo, técnico y administrativo, considerando aspectos tales como la docencia, la investigación, la selección de equipos, la frecuencia de repetición anual de las tareas, la realización de programas de garantía de calidad o protección radiológica, la pertenencia del personal a comisiones de calidad de las distintas especialidades y los periodos de obsolescencia del equipamiento, elaboración de informes, registro y archivo, entre otros.

Para cada tarea atribuida al personal del SPR (radiofísicos, técnicos y administrativos), se han calculado las horas necesarias y su frecuencia anual mediante la fórmula:

$$NT = \sum \frac{t_{\text{tarea}} \cdot F_{\text{tarea}}}{JL}$$

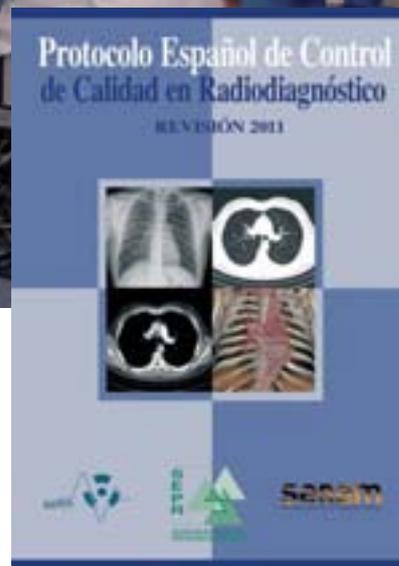
NT = número de trabajadores

t = tiempo de cada tarea

F = frecuencia anual de cada tarea

JL = jornada anual de trabajo

Para su aplicación práctica, el documento incluye una hoja de cálculo en formato Excel, que permite simular el número de personas necesarias en cada SPR en función de las tareas asignadas. Se trata de un método para la estimación del número de trabajadores, que es de fácil ejecución y proporciona resultados consistentes de forma inmediata. Esta tabla de cálculo se puede descargar asimismo de las páginas web de la SEPR y de la SEFM.



El método elegido para estimar el número de personas necesarias ha sido el de predefinir el número de horas para realizar cada función y el número de veces que se realiza anualmente. Posteriormente, multiplicando por el número de elementos que se han de controlar (N/F)

## Simulador para el cálculo de los medios humanos

Tipo de tarea	Tiempo (horas)			N/F	Tiempo resultante(horas)		
	Radiofísico	Técnico	Administrativo		Radiofísico	Técnico	Administrativo
<b>Controles de calidad</b>							
Acelerador	Monoenergético						
	Multienergético						
	Con técnicas especiales						
Planificadores de tratamiento							
Equipos de rayos X	Simples						
	Medios						
	Complejos						
CAE							
Detector de panel plano							
Cone beam CT							
CR							
Monitores de diagnóstico e impresoras láser							
Equipos de medida	Simples						
	Medios						
	Complejos						
Gammacámaras	SPECT						
	SPECT+CT						
PET	Normal						
	CT						
Tratamiento de imágenes clínicas							
Terapia metabólica (por cada 100 pacientes)	Paciente ingresado						
	Paciente ambulatorio						
<b>Dosimetría clínica (por cada 100 pacientes)</b>							
Simple							
Complejo							
IMRT, ICT, SBRT o braquiterapia							
Braquiterapia prostática o irradiación total con electrones							
<b>Protección radiológica</b>							
Gestión de instalaciones radiactivas							
Vigilancia dosimétrica TE (personal, rotatoria, área...)							
Gestión SRPR							
Docencia general							
Formación de residentes							
Desplazamientos (por cada 100 km)							

**N/F** = Número de equipos, pacientes o kilómetros (en fracciones de 100) o frecuencia anual de la tarea.

se obtienen las horas necesarias y dividiendo estas por el número de horas de trabajo anual de cada trabajador, resulta el número de trabajadores.

Se incluye en este artículo el modelo (sin datos) del simulador Excel para el cálculo de los medios humanos de un SPR.

Para la estimación de los medios materiales mínimos necesarios en un SPR se han analizado los reales decretos de garantía de calidad en instalaciones, así como los protocolos españoles de control de calidad en radiodiagnóstico, medicina nuclear y aceleradores de uso mé-

dico. Además se ha tenido en cuenta el equipamiento que se describe en el *Manual general de protección radiológica en el medio sanitario*, aprobado por el Foro en septiembre de 2002.

El análisis se ha llevado a cabo desde un punto de vista cualitativo, sin con-

**Tabla 1. Medios materiales para protección radiológica**

Tarea general	Referencia/prueba	Comentario / tarea específica	Equipamiento
Vigilancia dosimétrica de trabajadores expuestos	Art. 28, R.D. 783/2001	Trabajadores expuestos de categoría A: – Dosímetros individuales – Dosímetros de muñeca, anillo o cristalino – Riesgo de contaminación interna	– TLD, DLD – TLD, DLD – Bioensayo
Vigilancia del ambiente de trabajo	Art. 26, R.D. 783/2001	Trabajadores expuestos de categoría B:	– Monitores de radiación ambiental (fijos o portátiles) – TLD, DLD – Dosímetros de extremidades
Vigilancia y gestión de los residuos radiactivos	Título V, R.D. 783/2001	Protección radiológica de la población	– Detectores de radiación y/o contaminación – Balanzas (residuos sólidos) – Contadores de pozo (residuos líquidos)
Vigilancia ambiental	Art. 18, R.D. 783/2001	Radiación externa  Contaminación superficial  Contaminación atmosférica	– Detectores de radiación ambiental (incluso de neutrones) – Detectores GM, contadores proporcionales o contadores de centelleo (sólido o líquido) para medidas indirectas – Muestreadores de aire y monitores de contaminación – Espectrómetro (identificación del contaminante) – Detectores de radiación o contaminación
Gestión y control de fuentes y equipos	Niveles de radiación o contaminación  Pruebas de hermeticidad		– Contador de pozo – Monitor de contaminación o radiómetro – Pinzas, algodón, alcohol, papel de filtro...
Detectores y equipos de medida		De área Monitores ambientales portátiles De contaminación De control de rayos X Contadores <i>in vitro</i>	– Fuentes patrón
Instalaciones de rayos X		Declaración e informe de blindajes	– Detector de radiación
Medios adicionales de protección radiológica			– Carteles indicativos de zonas con riesgo radiológico – Prendas de protección frente a la radiación: delantales, guantes y gafas plomados, protectores tiroideos...

siderar ni el número de equipos o instalaciones que se han de controlar ni su dispersión geográfica, elementos que habrán de tenerse en cuenta para su aplicación práctica en cada caso.

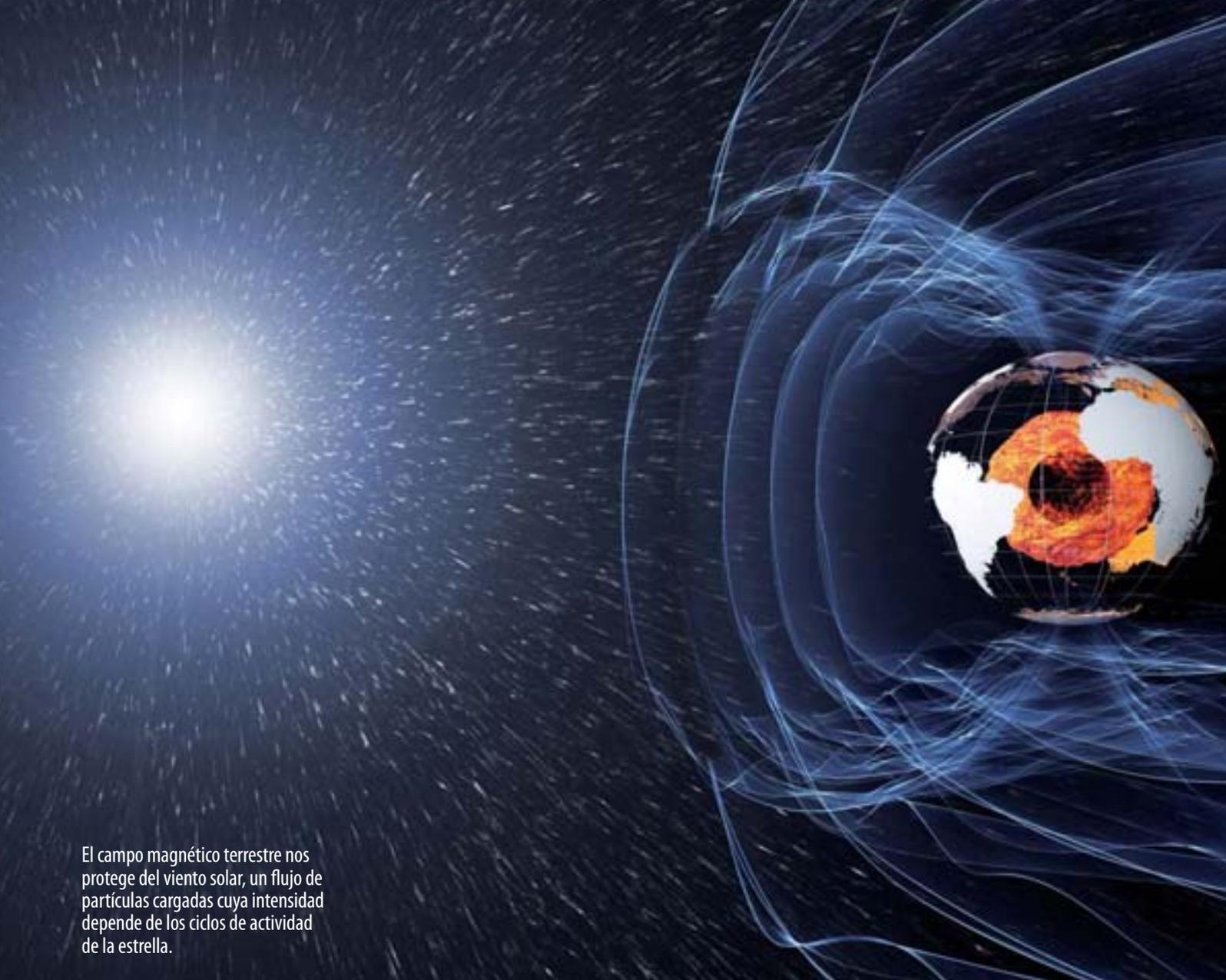
En el documento se detalla el equipamiento específico para llevar a cabo las tareas de protección radiológica y de dosimetría física y control de calidad de equipos de rayos X, medicina nuclear y aceleradores lineales.

En la tabla 1 se muestran de manera esquemática los medios materiales mínimos para llevar a cabo las tareas específicas de protección radiológica.

Con este documento, fruto de la colaboración existente entre las sociedades científicas y el organismo regulador a través del Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario, se ha conseguido disponer de una herramienta que permite, tanto al CSN como a la administración

sanitaria, estimar, de forma objetiva, y armonizar los recursos mínimos exigibles a un SPR para que pueda llevar a cabo su función de manera óptima.

Esta colaboración ha demostrado ser de gran utilidad para todas las entidades comprometidas en la consecución de altos niveles de calidad en protección radiológica, sin olvidar que los SPR, por sí mismos, son entidades que contribuyen a la fortaleza del sistema. ©



El campo magnético terrestre nos protege del viento solar, un flujo de partículas cargadas cuya intensidad depende de los ciclos de actividad de la estrella.

La actividad solar provoca las auroras boreales y también problemas en satélites, comunicaciones y sistemas eléctricos

## La atormentada vida del Sol

El Sol se encuentra en continua y dinámica crisis. Siguiendo ciclos de 11 años, esta actividad alcanza momentos de paroxismo durante la inversión de sus polos magnéticos, en los que se producen fuertes explosiones que arrojan un gigantesco flujo de partículas ionizadas al exterior que alcanzan nuestro planeta. Si las capas superiores de la atmósfera logran desviar el material

hacia los polos, la consecuencia será una bonita aurora polar. Si es más fuerte, la tormenta solar puede ocasionar problemas en las telecomunicaciones terrestres, en los satélites artificiales y hasta en los sistemas eléctricos, produciendo apagones a gran escala. Uno de estos eventos catastróficos podría ocurrir en los próximos años. ■ Texto: **Lucía Caballero** | periodista científica ■

ESA



Las auroras boreales son producidas por el viento solar.

La noche del 25 de enero de 1938, en plena Guerra Civil, el cielo de la península se tiñó de tonos rojizos. “Durante algunos momentos se creyó en un lejano incendio, pero pronto se dedujo, por la gran extensión del reflejo y por su altura, que obedecía a un fenómeno meteorológico”, describía la prensa española de la época. También en el resto de Europa dudaron de la naturaleza del evento. “Las autoridades suizas y francesas recibieron miles de llamadas preguntando si era un fuego, una consecuencia de la contienda o el fin del mundo”, aseguraban los periodistas de Associated Press.

Al día siguiente del evento, los periódicos españoles daban al fin con la clave:

“Ha podido ser observada desde varias capitales de Europa una aurora boreal”, rezaba uno de los titulares. Después de consultar a expertos de varios observatorios astronómicos, los informadores pudieron determinar la verdadera causa del espectáculo.

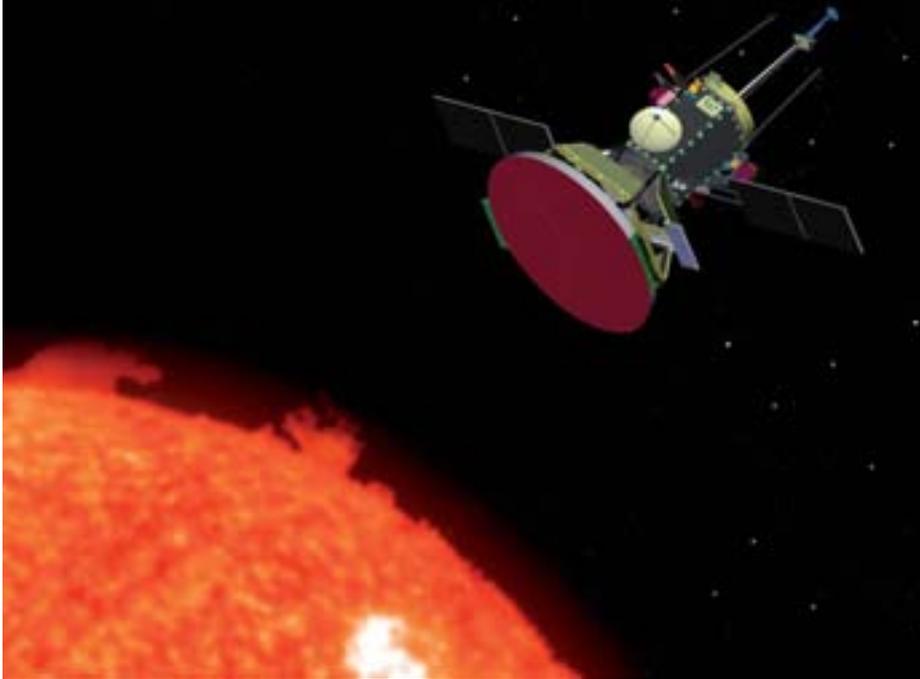
Lo que presenciaron aquella noche de invierno en la parte central del planeta (desde el oeste de Canadá al norte de África) es, como muestran las reacciones de los testigos, un evento muy poco común en estas latitudes. Las auroras abundan, sin embargo, en las zonas polares de ambos hemisferios (se llaman boreales las del hemisferio norte y australes las del sur), de ahí que se conozcan también como auroras polares. Este fenómeno constituye la cara más amable de las tormentas solares. “La intensidad de las tormentas se mide según su energía, el flujo de partículas que llega a la atmósfera y los efectos que causan”, explica Benjamín Montesinos, investigador en física solar del Centro de Astrobiología del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Para encontrar uno de estos sucesos no hace falta remontarse a épocas tan remotas. El 2 de agosto de este año, la So-

ciudad Astronómica Estadounidense alertaba de la inminente ocurrencia de una tormenta especialmente fuerte, que algunos científicos equiparan incluso con la que sucedió en 1859, bautizada como Suceso Carrington en honor del astrónomo británico que lo descubrió. “Alrededor del 28 de agosto de aquel año se produjo una gran eyección de material desde la corona solar y en torno al 2 de septiembre alcanzó su máximo de actividad en la Tierra”, cuenta Montesinos. La corona solar es la parte más externa del Sol, una especie de atmósfera inundada por gas ionizado o plasma. Su superficie no es estática, sino que se mueve constantemente, dando lugar a lo que se conoce como viento solar. “Aquel día de verano se vieron auroras boreales incluso en el Caribe, y también en Madrid”, apunta por su parte Miguel Gilarte, director del Observatorio Astronómico de Almadén de la Plata (Sevilla) y presidente de la Asociación Astronómica de España.

Carrington fue el primero en sugerir la existencia de un flujo continuo de partículas del interior al exterior del Sol, 100 años antes de que Eugene Parker acuñara el término de viento solar. “El 1 de septiembre de ese año, Carrington estaba observando un gran grupo de man-

Recreación de la Solar Probe+, cuyo lanzamiento está previsto en 2015.



## La predicción del tiempo solar

Igual que los medios de comunicación dan cada día la información meteorológica, la actividad solar también es objeto de un parte diario, que se puede ver en <http://spaceweather.com/> e incluso recibirlo por e-mail. El sistema que han diseñado los científicos para clasificar las eyecciones de la corona solar consta de cinco categorías nombradas con letras: A, B, C, M y X (de menor a mayor intensidad). Estos niveles dependen de la cantidad de rayos X emitidos durante el evento, cuya potencia se mide en vatios por metro cuadrado, medidos en la parte alta de la atmósfera terrestre por la flota de Satélites Geoestacionarios Operacionales Ambientales (GOES, por sus siglas en inglés) de la NOAA. Cada una de las clases se divide a su vez según una escala lineal, del 1 al 9. Además de estas naves, hay otros satélites dedicados a estudiar la dinámica y clima solar. El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO), un proyecto conjunto de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA), cuenta con 12 detectores que registran toda clase de datos, desde el volumen de protones que reciben hasta la velocidad del viento solar. Las sondas STEREO, un par de satélites que orbitan alrededor de la Tierra, producen imágenes tridimensionales para observar las eyecciones de masa coronal. Por último, el Observatorio de Dinámica Solar (SDO) es un telescopio de la NASA situado en órbita geosíncrona desde febrero de 2010.

NASA

chas en la superficie del Sol y pudo apreciar una intensa luz”, prosigue Gilarte. Unas 17 horas después la tormenta llegaba a la atmósfera y alteraba el campo magnético terrestre. Las infraestructuras eléctricas de la época sufrieron las consecuencias: los sistemas de telégrafos de toda Europa y Norteamérica dejaron de funcionar. Las llamaradas solares del Suceso Carrington liberaron 1.022 kilojulios de energía, el equivalente a 10.000 millones de bombas atómicas como la de Hiroshima, y 1.000 millones de kilogramos de partículas cargadas de electricidad que alcanzaron los 3.000 kilómetros por segundo en su viaje hacia el planeta azul.

Sucesos tan catastróficos pueden ocurrir con una frecuencia media de unos 150 años, según científicos de la NASA. “Ya hemos superado por cinco años ese periodo y la probabilidad de que un evento de esa magnitud se produzca durante la próxima década es de aproximadamente un 12 %”, decía Ashley Dale, de la Universidad de Bristol, en la revista científica *Physics World* el pasado agosto.

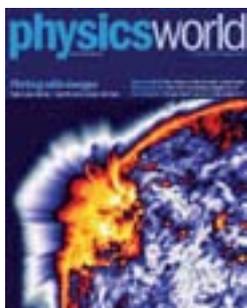
### Interacción con la Tierra

Todo comienza en las capas más altas y calientes del sol, en lo que se conoce como corona solar, donde tiene lugar una expulsión violenta de plasma y partículas ionizadas. Esta dinámica genera zonas oscuras en la superficie solar, que pueden ser observadas casi a simple vista y son conocidas como manchas solares. “Estas explosiones reciben el nombre de fulguraciones, aunque las más fuertes se denominan eyecciones de masa coronal”, señala Gilarte. “En ambos casos el resultado son gigantescas llamaradas que pueden llegar a alcanzar 100 veces el tamaño de la Tierra”, añade. El científico del INTA indica que el origen del fenómeno está en la interacción entre los intensos campos magnéticos del

astro que, como la Tierra, actúa como un enorme imán. Por esta razón, también se conocen como tormentas magnéticas. “Es como si las cuerdas de un violín se retorcieron hasta romperse y liberasen la tensión acumulada en forma de latigazo”, dice Montesinos. Fruto de ese “latigazo” surge una lluvia de radiación y partículas cargadas eléctricamente que pueden dirigirse a la Tierra, donde confluyen con la atmósfera y el campo magnético terrestre.

“Si la tormenta es muy potente, puede aplastar el campo magnético”, afirma el director del observatorio sevillano. Entonces, como asegura el investigador del Centro de Astrobiología, “puede producir apagones, problemas con las comunicaciones que tienen lugar en la parte alta de la atmósfera, alteraciones en las rutas de los aviones o desperfectos en los satélites”, prosigue. Estos daños pueden provocar

el corte de los servicios de telefonía e Internet, que necesitan de los satélites para operar. El fenómeno afecta asimismo a las señales de los GPS emitidas por estos; todos los vehículos o instalaciones que rijan su posición según esta herramienta quedarán inutilizados. Las partículas solares cargadas eléctricamente alteran la ionosfera, la capa de la atmósfera situada a unos 1.000 kilómetros de la superficie. La mayoría de los vuelos comerciales cuya ruta atraviesa el polo norte dependen de las señales de radio de onda corta que les llegan rebotadas de esta zona, por lo que, frente a tormentas graves, pueden verse obligados a cambiar su plan de vuelo. Si los iones llegan aún más cerca del suelo, la gran energía del material podría sobrecargar los transfor-



Portada de *Physics World* de agosto de 2014.

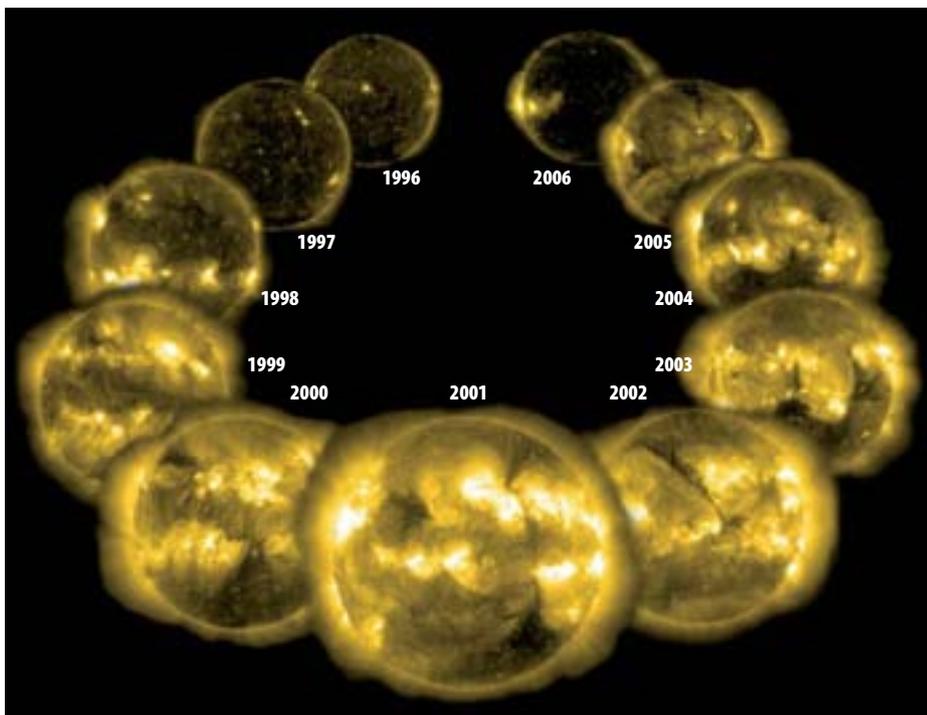


Miguel Gilarte, director del Observatorio de Almadén de la Plata (Sevilla).

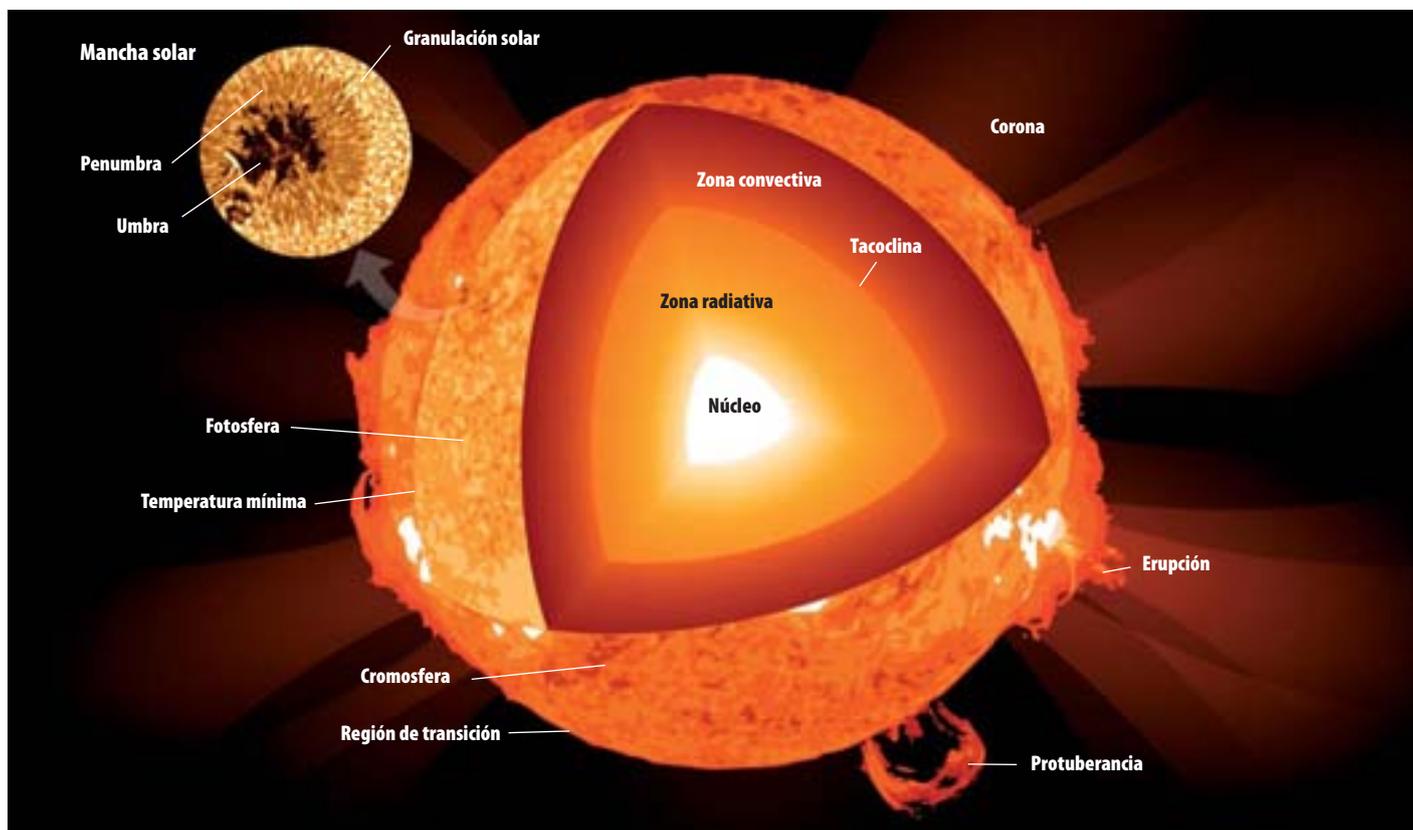
madores de alta tensión hasta causar un apagón a nivel mundial.

Afortunadamente, aparte de los posibles fallos en todos aquellos dispositivos que funcionen con electricidad, las tormentas solares no afectan a las personas directamente. “En la inmensa mayoría de los casos, el escudo que antepone el campo magnético terrestre canaliza las partículas hacia las zonas polares”, señala el in-

vestigador en dinámica solar. Gracias a esta capa de protección, denominada magnetosfera, predominan las auroras boreales frente a los eventos más fuertes y peligrosos. Además, las capas más altas de la atmósfera frenan la entrada a las partículas ionizadas, que no llegan a la superficie del planeta. Así lo comprobaron las naves de la misión Themis de la NASA, que suelen sobrevolar la magnetosfera para estu-



Variaciones de la actividad solar durante un ciclo.



Estructura del Sol.

diar la dinámica de las tormentas solares. Esta esfera contiene también sus propias partículas cargadas eléctricamente o plasma, por lo que se conoce también como esfera de plasma. Los registros de la flota revelaron que este frío y denso material se concentraba en los puntos de reconexión magnética, es decir, donde una tormenta solar había entrado en contacto con ella, para evitar que continuara avanzando hacia las capas inferiores de la atmósfera.

El proceso también puede apreciarse desde los telescopios situados en superficie, como el de Almadén. Gilarte asegura que allí observan todos los días la actividad solar y estudian la evolución de las manchas solares y las tormentas utilizando filtros de hidrógeno-alfa. La radiación emitida durante las erupciones se concentra en la zona del espectro electromagnético correspondiente a los rayos X y ultravioleta, cuyas longitudes de onda son similares a las del átomo de hidrógeno en el canal alfa. Así, el filtro selecciona esta

porción de toda la luz que recibe y la deja atravesar las lentes del telescopio, permitiendo a los investigadores observar nítidamente la dinámica de la actividad de las capas más externas del Sol. Más allá de la atmósfera, también existe otra red

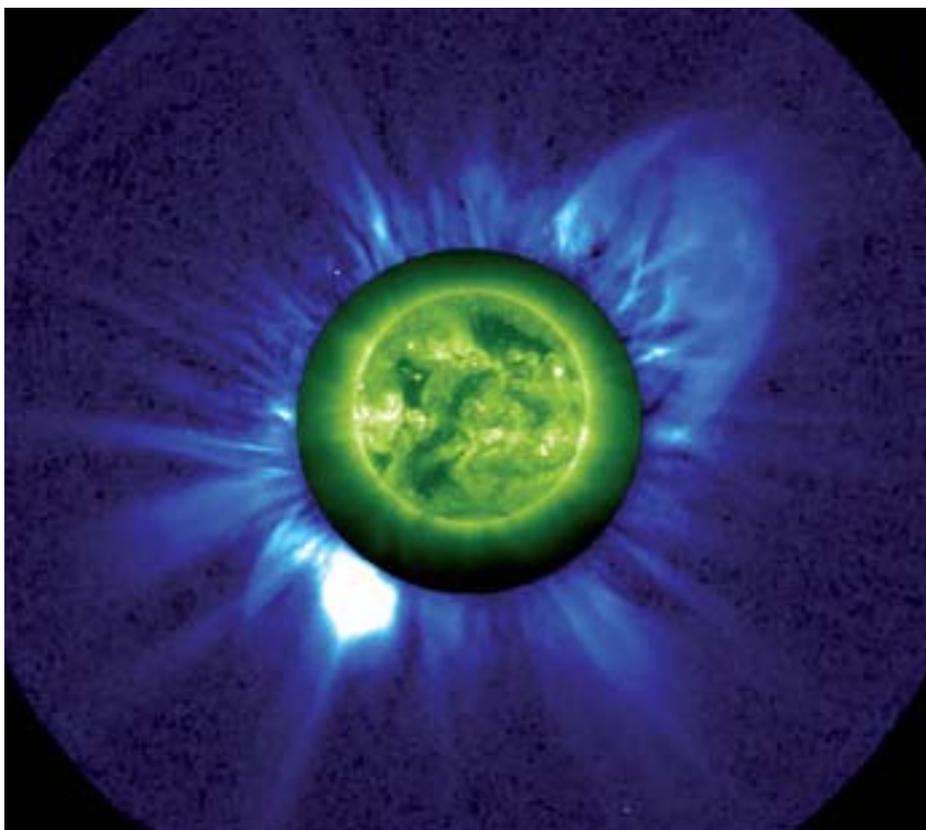


Benjamín Montesinos, investigador del CSIC.

de telescopios complejos localizados a bordo de satélites. Cuando va a producirse una explosión, “lo primero que se ve es una emisión intensa de luz”, señala el experto del ICTA. “Como la luz viaja a 300.000 kilómetros por segundo, la radiación llega

a los aparatos en solo ocho minutos y medio, el tiempo que tarda en recorrer los 150 millones de kilómetros que separan al Sol de la Tierra”, añade. Las partículas llegan más tarde, necesitan alrededor de dos o tres días para alcanzar la Tierra. Montesinos asegura que gracias a ese retraso los primeros destellos sirven de aviso para lo que se avecina. “Hay una disciplina que se llama Meteorología Espacial, que se dedica a predecir este tipo de fenómenos”, comenta.

“Las tormentas solares están asociadas a los ciclos de actividad solar”, explica por su parte Gilarte. Cada 11 años, los campos magnéticos solares se invierten y dan lugar a periodos de intensa actividad. Durante estos puntos álgidos aparecen en la superficie de la estrella un mayor número de manchas solares, regiones más frías (la temperatura puede descender hasta 2.000 grados respecto al resto de la superficie solar) con gran actividad, donde los efectos magnéticos



Erupción solar doble captada por Soho en agosto de 2013.

son especialmente intensos. En esas zonas se producen conexiones y rupturas de las líneas del campo magnético, las “cuerdas” del imaginario violín, lo que provoca fuertes eyecciones del material más externo de la corona del astro.

A la variabilidad existente dentro de un ciclo, hay que añadirle la diferencia entre cada uno de ellos, probablemente por la existencia de un ciclo añadido de un periodo mucho mayor, que algunos han calculado en 400 años. “Tenemos registros desde 1755 y hemos podido comprobar que no todos los ciclos son iguales”, dice el presidente de la Sociedad Astronómica Española. “En algunos ni siquiera se ha producido actividad, como en el denominado Mínimo de Maunder, que ocurrió entre 1645 y 1715”, prosigue. Si en un ciclo normal pueden aparecer del orden de 50.000 manchas solares en la superficie del astro, durante aquella transición solo se formaron 50. “Hubo una pequeña edad del hielo que

muchos achacan a la escasa actividad solar”, añade. Otro efecto que marca la fuerza de las tormentas es la edad del astro. Como ocurre con las personas, el envejecimiento disminuye la energía del Sol. Con sus 4.500 millones de años, no tiene la misma actividad que otras estrellas más jóvenes, donde las erupciones son más frecuentes y potentes.

### Aspectos desconocidos

Aunque no escasean los programas de investigación sobre la actividad del astro rey, todavía hay muchos aspectos desconocidos para los científicos. “Las mayores complicaciones surgen a la hora de interpretar y modelar los datos de las observaciones”, admite Montesinos. La complejidad de las tormentas solares hace difícil construir las hipótesis que permiten a los físicos explicar un fenómeno y llegar a predecir sus propiedades y posibles efectos. Los ingredientes del cóctel incluyen varias disciplinas: “intervienen la

física de fluidos, la física solar, la dinámica atmosférica y la variabilidad de los campos magnéticos”, enumera el trabajador del INTA. Aún no se sabe, por ejemplo, por qué los ciclos duran 11 años. Además, como indica Montesinos, “cuando se consiguen observaciones más detalladas aparecen nuevos interrogantes”.

Dos ejemplos de cómo los datos desvelan la aparición de estos eventos son las tormentas ocurridas en marzo de 1989 y octubre de 2003. Durante la primera, cuya intensidad fue inferior a la de Carrington, se produjo un apagón en los alrededores de Quebec (Canadá) que afectó a más de seis millones de personas. Y en la segunda se sucedieron incendios en diferentes centrales de alta tensión en Sudáfrica. Más tarde, en julio de 2012, tuvo lugar una doble eyección en la capa más externa del Sol, bastante similar a la ocurrida en 1859. Sin embargo, esta última no llegó a sentirse en la Tierra y solo fue registrada por los sensores del observatorio solar STEREO-A, colocado en la órbita geoestacionaria por la NASA en 2006. También a principios de este año se dio uno de estos eventos. El 9 de enero llegaron a las capas más altas de la atmósfera los vestigios de una llamada emitida por una mancha solar de más de 200.000 kilómetros de diámetro, según indicaba el Centro de Predicción del Clima Estelar estadounidense, dependiente de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, la NOAA.

Según algunos, aquel día de guerra de 1938 en que el helio y el oxígeno tiñeron de rojo el cielo no solo tuvo consecuencias en las comunicaciones. Muchos tacharon el acontecimiento de fenómeno paranormal y otros de señal sobrenatural. Los hay incluso que afirman que Hitler se lo tomó como una revelación: una semana después del suceso, el 4 de febrero, se autonombra jefe militar de Alemania y poco tiempo después encaminaba sus tropas hacia Austria. ©

# Denting en los generadores de vapor

Recientemente, en los nuevos generadores de vapor instalados en los años noventa en las centrales nucleares de Ascó y Almaraz se ha detectado el fenómeno de *denting* en el borde superior de la placa de tubos. Esta degradación no esperada en estos componentes parece estar asociada, como más probablemente, a los efectos causados como consecuencia de la acumulación de lodos e impurezas, provenientes del sistema secundario, sobre la placa de tubos, que provocan la deformación plástica del tubo desde la cara exterior hacia la interior y generan una serie de tensiones residuales en la zona afectada que han dado lugar a grietas de corrosión bajo tensión de orientación circunferencial. En consecuencia, ambas centrales han adoptado un conjunto de estrategias encaminadas a seguir manteniendo un adecuado nivel de seguridad en la planta. Para ello, están aplicando unos programas de inspección más extensos con el fin de caracterizar el estado de integridad de los tubos de los generadores, también han establecido medidas mitigadoras, cuyo objetivo principal es la reducción de productos provenientes del sistema secundario (cambios en las especificaciones de la química del secundario) o la eliminación de los productos e impurezas depositados en la placa de tubos (limpieza entre tubos por chorro de agua a muy alta presión). ■ Texto: **Carlos Mendoza Gómez** | jefe del Área de Gestión de Vida y Mantenimiento del CSN ■



Generadores de vapor en las instalaciones de ENSA.

Uno de los componentes principales relacionados con la seguridad de las centrales nucleares de agua ligera a presión (PWR, por sus siglas en inglés) son los generadores de vapor. Básicamente un generador de vapor es un intercambiador de calor que extrae calor del núcleo del reactor, transportado por el agua del sistema primario, mediante el calentamiento del agua del sistema secundario, proporcionando así vapor al sistema turbogenerador. La construcción de un generador requiere, por tanto, la utilización de tubos con material de gran conductividad térmica y a través de ellos, y en una extensa superficie, se produce la transferencia de calor entre los dos fluidos, sin que estos entren en contacto físico.

Los generadores de vapor cumplen una triple función:

—Intercambio de calor refrigerando el núcleo del reactor (foco frío del primario).

—Actuar como barrera de separación entre el primario y el secundario.

—Producir vapor para la turbina.

Los generadores se encuentran sometidos a severas condiciones de operación al actuar como barrera entre dos fluidos (aunque ambos sean agua) con distintas características de temperatura, presión, condiciones químicas, flujo, etc., que pueden favorecer la aparición de mecanismos de degradación; por esa razón, y para preservar las funciones antes señaladas, tanto durante su fabricación como desde el inicio de la operación comercial de una central, se establecen programas de vigilancia que permiten conocer el estado de la integridad de los tubos de los generadores de vapor a lo largo de su vida útil.

La experiencia operativa internacional muestra que los generadores de vapor instalados en plantas PWR, incluidos los de las plantas españolas, desarrollan diferentes mecanismos de degradación que pueden afectar en mayor o menor medida a la integridad de los tubos.

Estos mecanismos abarcan una amplia gama de fenómenos, entre los que se encuentran: desgaste en la superficie exterior del tubo por rozamiento con sus propios soportes o con las barras antivibratorias en la zona de la curva o con alguna pequeña parte suelta en el lado secundario (*fretting*, en inglés), defectos por corrosión en el borde superior de la placa de tubos, picaduras por impurezas del lado secundario (*pitting*), estrangulamiento o reducción del diámetro del tubo (*denting*), corrosión bajo tensión en la superficie interior del tubo y ataque intergranular.

La existencia de estos mecanismos ha obligado, durante todos estos años de explotación, a adoptar diferentes criterios preventivos, con el fin de evitar que se produjera la rotura franca de tubos o minimizar posibles fugas a través de la pared del tubo y, en consecuencia, a la reparación, normalmente con taponado o en ocasiones mediante encamisado, de multitud de tubos defectuosos. El taponado —colocación de un tapón en cada extremo del tubo que impide el paso de fluido a través de él— ha sido el principal proceso de reparación aplicado, lo que supone una pérdida de la capacidad de transferencia de calor en el componente y por tanto de rendimiento del sistema.

Para minimizar la problemática anteriormente mencionada, durante estos años se han incorporado medidas preventivas y mitigadoras, como el cambio de la química del secundario o el cambio del material de los tubos de los condensadores por otros de materiales con menor contenido en cobre o, incluso, la sustitución de las barras antivibratorias por otras de diseño más avanzado, así como las medidas tomadas para minimizar el ingreso de partes sueltas procedentes del secundario.

En general, las medidas adoptadas en esos años cumplieron con las expectati-

vas definidas, reduciendo la generación de nuevos defectos y ralentizando la evolución de los existentes; no obstante, a la vista de la extensa degradación que sufrían algunos de los generadores de vapor instalados en varias plantas españolas que utilizaron tubos con materiales menos avanzados, lo que podía afectar a la operación y llegar a comprometer la seguridad de la planta, y teniendo en cuenta otro tipo de aspectos, entre los que se incluyen los económicos, los responsables de estas plantas decidieron la sustitución de dichos componentes.

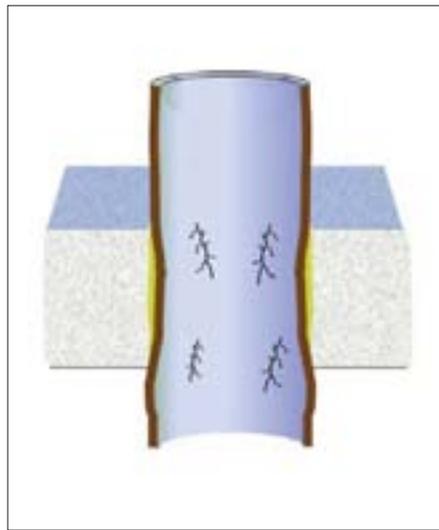


Figura 1. Detalle del *denting* en placas soporte.

Este artículo intentará aclarar en qué consiste el fenómeno llamado *denting*.

### ¿Qué es el *denting*?

De una manera general, el *denting* se conoce como la deformación de los tubos de los generadores de vapor debida, principalmente, al crecimiento de los óxidos de hierro (magnetita) depositados en el hueco existente entre la placa y el tubo, que al tener un mayor volumen provocan una reducción del diámetro del tubo (figura 1).

Este fenómeno no supone una pérdida de espesor en los tubos, pero sí puede originar un aumento de las tensiones residuales en la zona del tubo donde se produce la deformación, incrementando

la susceptibilidad de sufrir agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC, en sus siglas en inglés).

El *denting* fue, en la industria nuclear, uno de los principales problemas de degradación detectado en los generadores de vapor y una de las principales causas del taponado de tubos (por las grietas que se generaron) en los primeros años de operación de las centrales de agua ligera a presión, y conllevó una serie de estudios para analizar y comprender dicho fenómeno. Los resultados permitieron definir técnicas de inspección más fiables en la detección y caracterización de este tipo de defecto e identificar los cambios necesarios para mitigar o eliminar este proceso de degradación.

En los generadores de vapor originales de Almaraz y Ascó, este fenómeno se localizaba preferentemente en las placas soporte de la rama caliente y tuvo bastante contribución al número de tubos taponado.

Entre los años 1995 y 1997, las centrales nucleares Ascó I y II y Almaraz I y II sustituyeron los generadores de vapor originales, modelo D3 de Westinghouse, por otros del modelo 61W/D3 de Siemens-KWU con tubos de la aleación de Incoloy 800 modificado y con placas soporte de tipo rejilla de acero inoxidable y paso triangular, que, junto con las especificaciones de química aplicadas —basadas en el tratamiento conocido como AVT (*All Volatil Treatment*), con dosificación de hidracina para el control del oxígeno y amoníaco para el control y optimización del pH—, se consideró afectaría positivamente a la seguridad, debido a la menor susceptibilidad de sufrir los fenómenos de degradación existentes en los generadores originales.

Los resultados de las inspecciones realizadas desde de la instalación de dichos generadores hasta el año 2006 parecieron confirmar este hecho, ya que no se detectaron mecanismos de degrada-

## Generadores de vapor

Los generadores de vapor son evaporadores de cuerpo vertical y tubos en U con equipos de separación de humedad.

El refrigerante del reactor circula por el interior de los tubos en forma de U invertida con entrada y salida a través de las toberas situadas en el fondo hemisférico del generador, cediendo su calor, a través de la superficie de los tubos, al agua de alimentación que se encuentra en la parte secundaria del generador.

A continuación, se describen someramente algunas de las partes de este componente que se mencionan en el artículo:

—Placa de tubos: es una placa de gran grosor que constituye, junto con los tubos, la barrera de separación entre el circuito primario y el secundario. Está fabricada de acero al carbono y en la parte del primario se encuentra recubierta por un material de aleación de base de níquel resistente a la corrosión y que permite que los tubos puedan soldarse.

—Tubos en U: los tubos son los encargados de transferir el calor de un circuito a otro. Cada generador dispone de un haz tubular con determinado número de tubos, dependiendo del diseño. Los nuevos generadores tienen 5.130 tubos de Incoloy 800 modificado, de 19,05 mm de diámetro y 1,09 mm de espesor.

Los tubos se encuentran soportados por la placa de tubos y por nueve rejillas horizontales de acero inoxidable, que permiten la circulación del agua y reducen al mínimo las vibraciones de los tubos, evitando choques o roces entre ellos.

—Placa distribuidora de flujo: es una placa situada ligeramente por encima de la placa de tubos, que permite distribuir el flujo de entrada de agua al haz tubular, manteniendo una velocidad de flujo alta que evitará la sedimentación de lodos sobre la placa de tubos.



neradores y se amplió su alcance, así como el uso de diferentes tipos específicos de sondas de corrientes inducidas, con el objetivo de detectar y caracterizar de manera adecuada el grado de extensión de esta degradación.

Del resultado de las sucesivas inspecciones realizadas en los generadores de vapor de Ascó y Almaraz se concluye lo siguiente:

—Se observan depósitos de lodos acumulados en la parte superior de la placa de tubos, en las zonas centrales del haz tubular de ambas ramas y, en general, la rama fría es la más afectada.

—La zona preferente de acumulación de lodos es aquella que coincide con el orificio de la placa distribuidora de flujo, y, por tanto, donde menor circulación tiene el agua en el lado secundario, es decir, zona de remanso.

—Se observa deformación por *denting* en tubos localizados en las zonas afectadas por los depósitos de lodos duros, preferentemente. Según los resultados, el número de tubos afectados por *denting* es mayor en la rama fría que en la caliente, a excepción del caso de Ascó I, que tiene un mayor número de tubos afectados por *denting* en la rama caliente que en la fría.

—En determinados tubos afectados por *denting* se han identificado grietas de corrosión bajo tensión de orientación circunferencial en la cara exterior de los tubos (lado secundario).

—En todos los tubos que presentan indicaciones asociadas a grietas circunferenciales se ha confirmado la existencia de *denting* en el borde superior de la placa tubular, si bien no se ha podido establecer ninguna correlación entre la amplitud en voltios de la indicación de *denting* y la presencia de indicación asociada a grietas. En los casos de múltiples indicaciones en el mismo tubo, todas

ción activos ni, en particular, relacionados con *denting* que, como consecuencia de los criterios de prestaciones aplicables, hubieran requerido la reparación del tubo (taponado).

### **Denting en los nuevos generadores**

En 2006, durante la inspección periódica por corrientes inducidas de los tubos de uno de los generadores de la unidad II de la central de Almaraz, se observaron, por primera vez, indicaciones caracterizadas como *denting* en la zona del tubo coincidente con el borde superior de la placa tubular. Posteriormente, en

otra planta española con generadores idénticos (Ascó) se detectaron estas mismas indicaciones. En los primeros análisis realizados se observó que los tubos con indicaciones de *denting* se localizaban en zonas en las que existía una significativa acumulación de lodos en la cara exterior del tubo y aparentemente con un alto grado de consolidación, identificándose como lodos duros.

A raíz de la detección de *denting* en los nuevos generadores de vapor, los programas de inspección seguidos hasta entonces, basados en la carta genérica (GL) 2006-01, fueron revisados y ampliados. Se extendieron las inspecciones a los tres ge-

**Tabla 1. Situación del fenómeno de *denting* en los nuevos generadores de vapor**

	Ascó I	Ascó II	Almaraz I	Almaraz II
Temperatura Rama caliente / fría (°C)	327/288	327/288	328/289	328/289
Material del tubo	800 Modificado	800 Modificado	800 Modificado	800 Modificado
Material de la placa de tubos	SA-508 Gr3 Clase 1			
<i>Denting</i> rama caliente (HL)	285	0	23	548
<i>Denting</i> rama fría (CL)	443	581	1.151	1.284
SCC rama caliente	8	0	0	87
SCC rama fría	0	0	12	61

Datos obtenidos del informe de la última inspección.

ellas están localizadas en la misma sección del tubo

Como consecuencia de los defectos de SCC (*stress corrosion cracking*) detectados, se han taponado y endurecido ocho tubos en Ascó I y ninguno en Ascó II, y 12 y 148 en Almaraz I y II, respectivamente. Un resumen de la situación actual, características de operación del generador y materiales, se presenta en la tabla 1.

Este tipo de indicaciones de *denting* también ha sido detectado en plantas fuera de España con generadores de vapor recientemente sustituidos, como el caso de Döel 3 en Bélgica y Ginna en Estados Unidos, y se localizan en las mismas zonas, aunque hasta la fecha no se han detectado defectos de SCC por dicha causa. En Krsko (Eslovenia), cuyos generadores también fueron reemplaza-

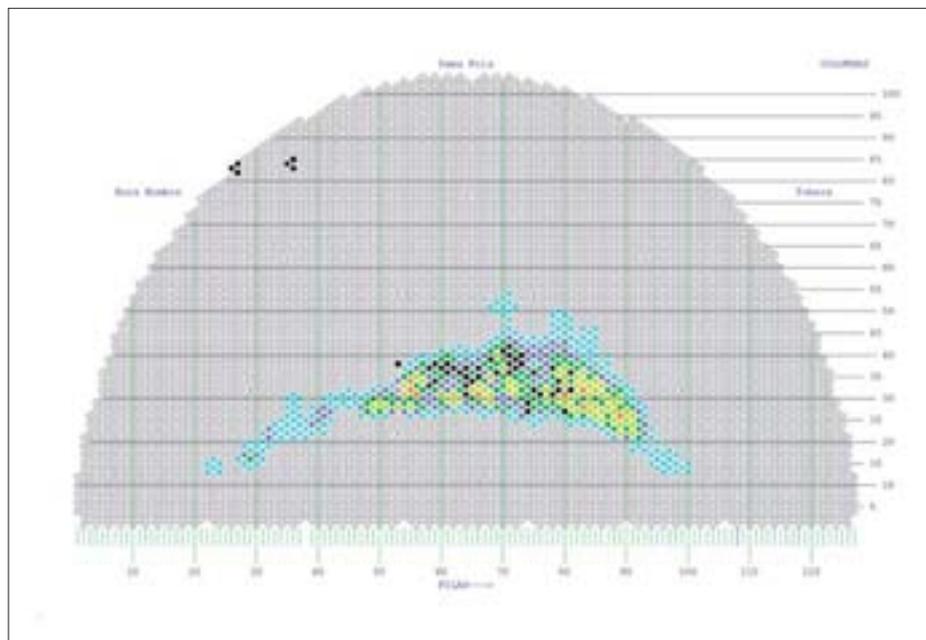


Figura 2. Ejemplo mapa de la distribución del *denting* en rama fría.

dos, se detectó un caso similar de *denting* en un tubo que fue taponado.

Con el objetivo de mitigar el efecto del *denting*, las plantas españolas afectadas implantaron un conjunto de estrategias como: 1) a corto plazo realizaron cambios en la química del secundario, mejoras en los procesos de arranque y parada de la planta, limpiezas de lodos, etc., y 2) a largo plazo iniciaron una serie de estudios para conocer el origen de este fenómeno, su relación con la formación de lodos duros por encima de la placa de tubos de los generadores de vapor y la causa de su endurecimiento.

## Causas y efectos de los depósitos.

### Inspección

#### Formación y composición de lodos

Como se ha indicado anteriormente en este artículo, de la observación común de los resultados de las inspecciones parece evidenciarse una aparente relación entre la existencia de depósitos de lodos normalmente duros y los tubos afectados por *denting*, razón por la que gran parte de los estudios realizados, en fase de ejecución, se han encaminado a determinar las características de aquellos: composición de los lodos, influencia en los materiales de los generadores, dinámica de formación, posible influencia en la formación del *denting*, etc. Los resultados permitirán definir las estrategias de actuación más eficaces para la resolución de este problema.

Según los análisis realizados sobre los datos existentes, los lodos se forman en las regiones de baja velocidad de flujo en ambos lados del generador —ramas caliente y fría— como consecuencia de la entrada directa de impurezas, óxidos y otros productos arrastrados por el agua de alimentación, así como de la sedimentación por gravedad del material existente en las paredes de los tubos o en determinados diseños en las placas soportes.

En algunos generadores, como es el caso de Ascó y Almaraz, existe una placa distribuidora de flujo que se encarga de dirigir el flujo de entrada del agua de alimentación al haz tubular; dicha placa dispone de un orificio en la zona central que provoca una disminución de la velocidad del flujo (zona de remanso) en esa zona, lo que favorece la acumulación de lodos en ella.

Por esa razón, es frecuente observar que la distribución de los lodos sobre la placa tubular adopta una forma similar a la de un riñón (figura 2).

La tipología de los lodos presenta diferentes propiedades físicas dependiendo de las condiciones bajo las cuales se forman, y pueden variar desde una gran movilidad —lodos “removibles”— a muy consolidados —lodos “duros”—. Además, es de suponer que el lodo blando pueda endurecerse con el tiempo, aunque el mecanismo de esta transformación no está todavía claro. A estos depósitos que con el tiempo pueden endurecerse —formados alrededor de los tubos y en ocasiones haciendo puente entre tubos vecinos— se les conoce como *collars*.

En los generadores primitivos, el endurecimiento de los lodos se debía a las reacciones entre especies de hierro, incluyendo magnetita y fosfatos, para formar compuestos de fosfato de hierro y sodio (estructuras tipo maricita). Sin embargo, este mecanismo no se considera actualmente relevante, dado que los actuales generadores nunca han operado con química de fosfato.

Los datos disponibles sobre la composición de los *collars* evidencian una composición heterogénea, razón por la que existen dudas sobre los procesos seguidos para la consolidación —endurecimiento— de los lodos. No obstante, los análisis efectuados sobre la composición de estos *collars* permiten afirmar lo siguiente:

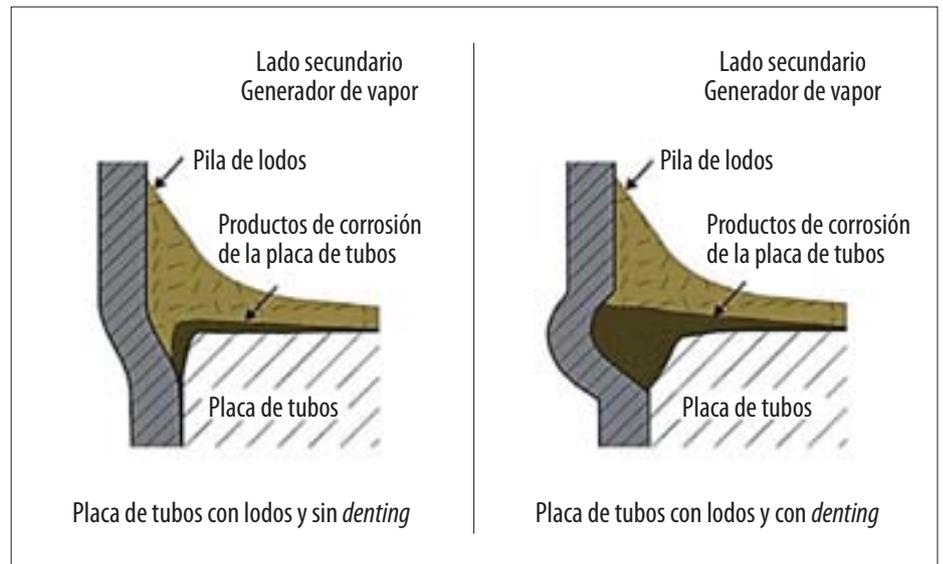


Figura 3. *Denting* en placa de tubos asociado a los lodos depositados.

—El aluminio y el silicio son los elementos que aparecen frecuentemente. Estos elementos pueden contribuir al endurecimiento de los lodos, junto al calcio y al magnesio.

—En las muestras extraídas en los generadores de Ascó y Almaraz, el componente mayoritario de los lodos es la magnetita (93%). En menor medida se encuentran presentes: ferritas de níquel, cromo, manganeso, zinc, óxidos de aluminio y otras especies de naturaleza orgánica.

Es decir, se confirma que el mayor aporte de especies proviene del circuito secundario, debido a la corrosión de los aceros al carbono utilizados en la fabricación de los componentes de los sistemas secundarios, a las fugas a través de los tubos de los condensadores, a los transitorios químicos, etc.

Otra razón que puede favorecer la acumulación de depósitos en estos generadores es la alta densidad de tubos (menor espacio entre tubos), junto con un caudal de purga bajo, que impide una adecuada extracción de los lodos existentes en el lado secundario del generador de vapor. Hay que tener presente que los originales tenían 4.674 tubos cada uno y los actuales tienen 5.130, en ambos casos con el mismo diámetro.

### Desarrollo del *denting*

Según estudios recientes, se consideran dos posibles mecanismos para explicar la aparición de *denting*:

—Corrosión de la placa de tubos en la zona del resquicio entre tubo/placa de tubos (también denominado *crevice*).

La corrosión se produce en la zona del *crevice* existente en la parte superior de la placa de tubos, como consecuencia de la existencia de lodos duros y de la acumulación de impurezas en él, produciéndose una alteración local de la química del circuito secundario que da lugar a ambientes no protectores de la corrosión que provoca la formación de óxidos de hierro provenientes de los aceros al carbono de baja aleación de los que están fabricadas las placas de tubos. El mayor volumen de los óxidos respecto al metal del que proceden produce la deformación del tubo (figura 3).

—Corrosión de la pila de lodos.

El *denting* se produce como consecuencia de la corrosión de las partículas embebidas en la pila de lodos. Las partículas pueden llegar al lado secundario del generador en operaciones de mantenimiento o bien se encontraban allí desde la fase de fabricación/construcción. Estas partículas, durante la fase de operación, son

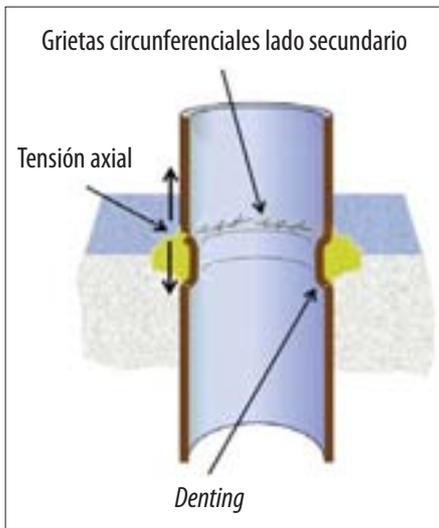


Figura 4. Detalle del posible efecto del *denting*.

oxidadas, provocando un aumento del volumen de los lodos, que pueden producir la deformación del tubo a la altura del borde superior de la placa de tubos.

Según estudios realizados, los casos reportados de *denting* en la placa tubular, en generadores similares a los de Ascó y Almaraz, parecen producirse según el primer mecanismo.

No obstante, en ambos casos la condición necesaria para que se produzca el fenómeno es la presencia de un oxidante,

además de la acumulación de lodos, existencia de material susceptible de oxidación, ambiente agresivo por concentración de impurezas, de ahí que, junto con una buena química, limpieza y reducción del inventario de lodos, etc., es imprescindible mantener unas condiciones reductoras en todo momento en los generadores.

Del análisis de los resultados de las inspecciones, se observa que la mayoría de los tubos con *denting* tienen depósitos de lodos, sin embargo, no es posible realizar una correlación entre el alcance de los depósitos, en cuanto al número de tubos con lodos ni en la cantidad (altura de los lodos), con el de tubos afectados por *denting*. Estudios recientes confirman esta observación, por ejemplo, Almaraz I y Döel 3 tienen un grado de afectación por lodos similar, mientras que en Ginna es sustancialmente mayor; sin embargo, el número total de tubos afectados por este fenómeno en Ginna está entre los de Döel 3 y los de Almaraz I.

Otro aspecto también observado es que, si bien la cantidad de lodos y el número de tubos afectados por estos es

muy similar en ambas ramas de los generadores, parece evidenciarse de una forma general, con la excepción ya mencionada de Ascó I, que la rama fría de los generadores es la más afectada por *denting*.

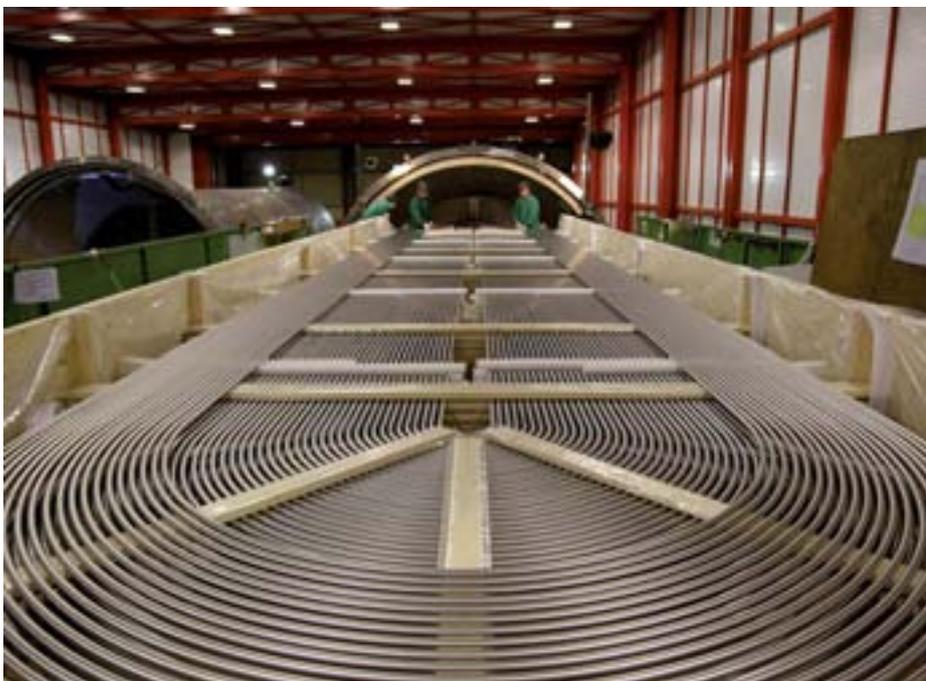
Inicialmente se pensó que la temperatura podría favorecer la aparición de corrosión, por lo que la rama caliente debería ser la más afectada por defectos asociados al *denting*; sin embargo, estudios recientes postulan lo contrario, al considerar que la capa de vapor existente en la rama caliente puede impedir la concentración de impurezas en sus resquicios.

Otro aspecto a considerar es el diseño del propio generador ya que las condiciones termohidráulicas del secundario pueden facilitar la acumulación de lodos en la rama fría más que en la caliente.

## Efectos

Como se ha dicho anteriormente, el *denting* provoca la aparición de tensiones axiales en la sección del tubo deformada, dando lugar a la iniciación y propagación de grietas de corrosión bajo tensión en la cara exterior del tubo. En estudios realizados, se evidencia que, en la mayoría de los casos de este tipo de deformación, las tensiones axiales suelen ser mayores que las circunferenciales, lo que favorece que las grietas producidas tengan una orientación circunferencial, como ocurre en los casos observados en Ascó y Almaraz (figura 4).

Los resultados observados hasta la fecha en Ascó y Almaraz muestran que, a pesar de que existen menos tubos con *denting* en la rama caliente, existen más defectos de corrosión bajo tensión en la rama caliente. Esto podría estar justificado al considerar la temperatura como un factor que contribuye a la existencia de grietas de corrosión bajo tensión, que hace que sea más probable que se inicien grietas de SCC en el lado caliente del generador.



Montaje de haz tubular.

Basándose en las inspecciones realizadas y a la información de los tubos extraídos, se conoce que la deformación sufrida por el tubo debida al *denting* puede adoptar diferentes formas ovaladas, esto afecta a las tensiones producidas en la zona y a su dirección, por lo que se resulta muy complejo realizar predicciones de SCC a partir de los datos del tamaño de *denting*. Por tanto, para asegurar suficientemente el estado de los tubos, es conveniente realizar programas de inspección que permitan caracterizar adecuadamente el *denting* y su evolución (figura 5).

### Detección

El examen por corrientes inducidas (ET, de la denominación en inglés de *Eddy Current Testing*) es el método de inspección habitual utilizado en la industria para inspeccionar los tubos de los generadores. Este examen se realiza mediante una sonda introducida por el interior del tubo y que contiene diferentes configuraciones de bobinados eléctricos, en función del defecto que se ha de detectar.

El *denting* puede ser detectado y dimensionado mediante el uso de la sonda circular, pudiéndose determinar el grado de deformación del tubo a partir de la amplitud de la señal obtenida (volts). Sin embargo, debido a que la deformación puede ser asimétrica, y que la sonda circular integra la inspección a lo largo de los 360° del tubo y por tanto no discrimina por generatrices, se recomienda la utilización de otro tipo de sondas con bobinados puntuales, como puede ser la sonda de ocho bobinados distribuidos cada 45° o la sonda rotatoria, donde en ambos casos los bobinados no llegan a tocar la cara interior del tubo para la caracterización adecuada del *denting*.

En 2009 se detectaron en España, mediante el examen por ET, tubos con indicaciones asociadas a grietas circunferenciales de SCC en zonas de tubos

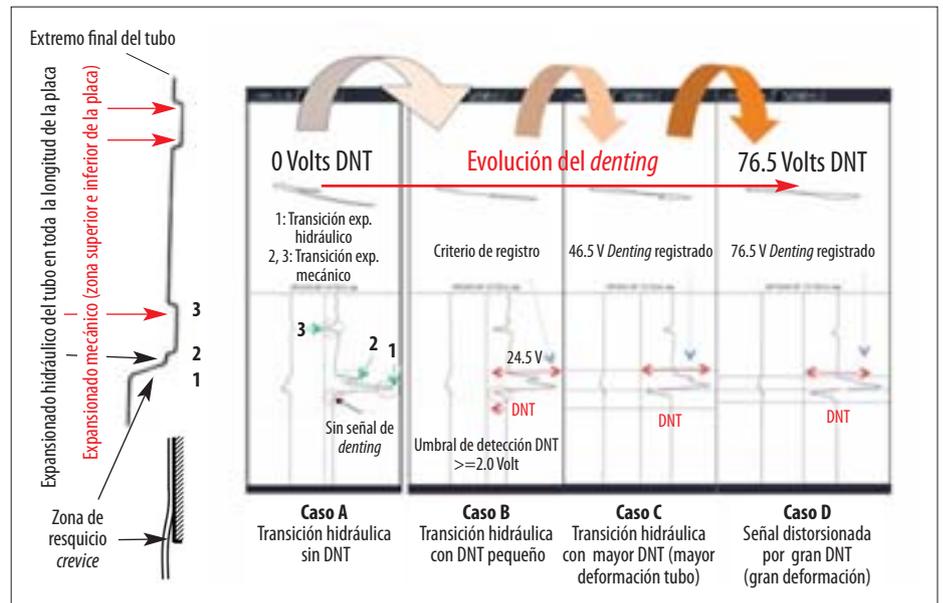


Figura 5. Caracterización y evolución del *denting*.

con *denting*. Los defectos fueron identificados y caracterizados mediante el uso de la sonda rotatoria con bobinados en contacto con el tubo. Adicionalmente, se realizaron exámenes por ultrasonidos en una serie de tubos en su mayoría afectados por indicaciones asociadas a grietas de SCC, para confirmar los resultados de la inspección por ET. Posteriormente, la coherencia de los datos obtenidos por el examen de ET y de ultrasonidos ha servido para cualificar

las técnicas de ET usadas en la inspección de los tubos, de acuerdo con la metodología de validación actualmente aplicable en España.

Por otro lado, en 2010 se extrajeron tres pedazos de otros tantos tubos del generador de Almaraz II —dos de los cuales tenían indicaciones asociadas a grietas, y el otro solo *denting*— para ser analizados mediante ensayos destructivos. Los resultados de los análisis confirmaron una excelente correlación entre los resultados de la inspección por ET y los defectos realmente encontrados en laboratorio, así como el mecanismo de degradación que produjo las grietas, y al mismo tiempo sirvió para verificar la capacidad de las técnicas de inspección utilizadas, ya que permitió comparar los



Sonda de corrientes inducidas.



Equipo de inspección.

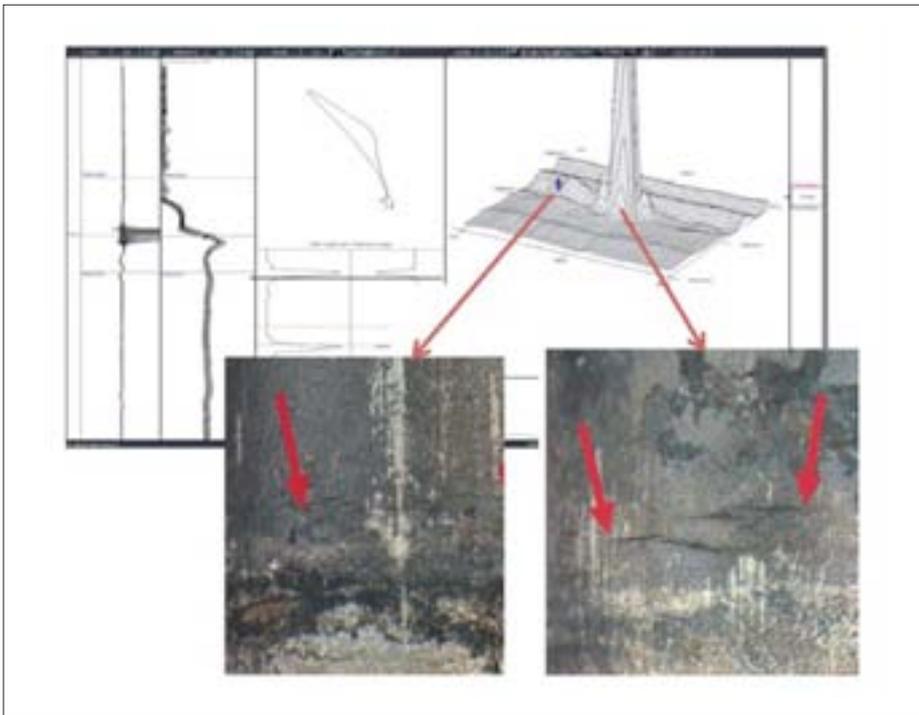


Figura 6. Indicación de grieta en tubo extraído.

registros de los exámenes por ET con los ensayos destructivos realizados en los tubos extraídos. En la figura 6 se puede observar un detalle de los defectos de uno de los tubos extraídos y el registro obtenido por ET.

### Planes de mitigación efectuados. Acciones de futuro

Como se ha señalado anteriormente, no es la primera vez que se establecen medidas de mitigación para prevenir el *denting* y los potenciales efectos que pudiera producir, como la aparición de grietas por corrosión bajo tensión. Basadas en la experiencia existente, las estrategias actualmente recomendadas son las siguientes:

—Optimización de la gestión de los lodos, con el objetivo de minimizar la acumulación de lodos para reducir el proceso de *denting*. Las acciones previstas son:

- Realizar limpiezas de lodos más eficaces y con mayor frecuencia.
- Reducir en lo posible el transporte de hierro por el agua de alimentación.

- Limpieza química del secundario de los generadores.

—Mejorar la respuesta a los transitorios de química, fijando límites y acciones sobre los parámetros de control que tienen relación directa con la degradación.

—Tratamiento para mejorar el ambiente químico en la zona de *crevice*.

—Uso de inhibidores para mitigar el fenómeno de SCC.

—Reducción de la temperatura de operación. Esta medida podría adoptarse mientras se implantan otras medidas.

De acuerdo con estas recomendaciones, el plan adoptado por las plantas afectadas en España ha sido el siguiente:

—Aplicación de las guías químicas de EPRI (*Electric Power Research Institute*), que son más restrictivas que las aplicadas hasta la fecha que estaban basadas en las guías del suministrador de los generadores.

—Establecimiento de guías químicas en operación para asegurar un control de los parámetros del circuito secundario que tengan relación con la degradación.

Es decir, asegurar que se mantienen condiciones reductoras en todo momento en el generador de vapor, incluso en la fase de arranque y parada.

—Realización de limpiezas de lodos e inspección visual del secundario. En relación con este punto se han realizado limpiezas de la placa de tubos mediante chorro de agua (*sludge lancing*, denominado en inglés) en todas las paradas desde la detección de este mecanismo. Esta limpieza se ha realizado en algunas ocasiones con lanzas a altas presiones (*hard sludge lancing cleaning*) y por el interior del haz tubular en los espacios entre tubos, proceso denominado *inner bundle lancing*.

—Realización de limpieza química del secundario de los generadores en ambas unidades en Almaraz y Ascó I. En Ascó II se prevé para la próxima parada por recarga.

—Programa de inspecciones con un amplio alcance para vigilar la evolución de los lodos y del *denting*, así como para asegurarse la detección de posibles grietas de SCC.

Finalmente, cabe concluir que, si bien aún existen dudas sobre algunos aspectos, como ¿por qué se produce el endurecimiento de los lodos tan rápidamente?, ¿cuál es la susceptibilidad del material de los tubos a sufrir agrietamiento por corrosión bajo tensión?, ¿por qué no se ha generado *denting* y grietas en otros generadores de vapor del mismo fabricante y con el mismo material de tubos?, que hacen pensar en la conveniencia de seguir manteniendo en nuestro país líneas de investigación para dar respuesta a estas dudas actualmente planteadas acerca de este fenómeno. Se puede considerar que el nivel de seguridad de los nuevos generadores es aceptable gracias a los planes de mitigación adoptados por las plantas afectadas, así como a los programas de inspección actualmente implantados. ©

Juan Fuster Verdú (Alcoy, 1960), copresidente del Comité Organizador de ICHEP2014, es físico experimental de partículas y profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Trabaja en el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto CSIC-Universidad de Valencia. Comenzó su actividad en el centro de investigación DESY (Hamburgo, Alemania). De 1987 a 1996 estuvo en el experimento DELPHI del CERN. Tras su vuelta a Valencia inició en el IFIC un grupo, para desarrollar detectores de silicio aplicados a experimentos de física

de partículas, pionero en España. Este grupo construyó parte del detector interno de silicio del experimento Atlas del LHC. Desde 2005 trabaja en el desarrollo del futuro acelerador lineal de partículas lineal (ILC). Actualmente es presidente europeo del estudio de física y detectores para el Colisionador Lineal nombrado por ECFA (European Committee for Future Accelerators). Ha sido director del IFIC (2003-2007), gestor del Plan Nacional de Física de Partículas (2007-2010) y coordinador del Área de Ciencias Físicas del CSIC (2010-2012).

## Entrevista a Juan Fuster, copresidente del 37º Congreso Internacional de Física de Altas Energías

# “Aún no hemos visto la verdadera cara del bosón de Higgs”

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

**A** pesar de su enorme complejidad, el mundo de las partículas elementales, esas con las que están construidas las cosas que nos rodean y nosotros mismos, resulta muy atractivo para los ciudadanos con un mínimo de curiosidad. Eso explica que el descubrimiento del bosón de Higgs, un ente que ni siquiera muchos físicos entienden muy bien, ocupara la portada de los principales medios de comunicación de todo el mundo cuando se anunció, el 4 de julio de 2012, el día en que se inauguró la 36ª Conferencia Internacional de Física de Altas Energías (ICHEP), el evento más importante

del mundo en esta disciplina. Dos años después, el Higgs ha seguido siendo la estrella más rutilante de la 37ª ICHEP, que se ha celebrado en Valencia entre los días 2 y 9 del pasado mes de julio.

**PREGUNTA:** *¿Está satisfecho de los resultados de la conferencia?*

**RESPUESTA:** Los resultados me parecen bastante buenos. No podemos pedir lo que no hay, porque no siempre se presenta un descubrimiento de Premio Nobel, pero en todas las conferencias se dan a conocer algunos descubrimientos interesantes. Yo resaltaría el trabajo hecho con el bosón de Higgs, midiendo sus

propiedades, sus acoplamientos, canales de desintegración, su masa, su anchura, su spin, al nivel de máxima precisión que se ha conseguido.

**P:** *¿Podemos decir que tenemos ya un retrato robot de este bosón?*

**R:** Algo así, pero falta aún mucha más precisión para realmente hacerlo con propiedad, solo tenemos un boceto muy tosco, muy poco definido. Aún no hemos visto su verdadera cara. Y es que el Higgs es un objeto muy complicado, con muchas implicaciones en el modelo estándar. Más que lo que es, sabemos lo que no es; sabemos que es una nueva

ANTONIO CALVO ROY





## “Hay que empezar a diseñar los futuros aceleradores para dentro de 20 años”

**PREGUNTA:** *Ustedes esperan encontrar en el nuevo LHC indicios de la supersimetría, pero ¿qué ocurre si no aparece nada nuevo?*

**RESPUESTA:** Imagínate que no encontramos nada más que lo que ya conocemos. Habría que esperar a la construcción de nuevas máquinas. Primero creo que habría que construir un acelerador leptónico, capaz de medir con mucha más precisión de lo que puede hacer el LHC toda la física del Higgs, del top y del W. Y hay dos proyectos de acelerador lineal

clase de materia y una nueva interacción, que no es un leptón, ni un quark ni un bosón intermediario de fuerzas, y que su interacción no está asociada a ninguna simetría interna como todas las demás. Está todo por hacer y por eso este es un momento apasionante.

**P:** *¿Y cuándo pasaremos del retrato robot a la fotografía?*

**R:** Eso es muy difícil aún siquiera de predecir. Se necesita mucha mayor precisión porque la física del Higgs es una puerta hacia una nueva física. Al encajar los datos actuales del Higgs y del quark top en el modelo estándar se obtiene como resultado que vivimos en un Universo al borde de la inestabilidad, ¿por qué la naturaleza ha elegido vivir en un sitio tan arriesgado? Si fuera inestable nosotros no podríamos existir. La explicación más probable es que nuestro modelo estándar no es la explicación última y debería existir algo *nuevo* que compense esa situación. Y para avanzar hacia su descubrimiento lo esencial ahora es conocer mejor el quark

top y el Higgs. De todas maneras, para llegar a una buena fotografía, y con alta resolución, del Higgs hará falta todo el programa del LHC, incluida su extensión de Alta Luminosidad (HL-LHC), que se iniciará la próxima década, y probablemente otros nuevos aceleradores del tipo electrón-positrón, que nos permitan llegar a una precisión muy alta.

**P:** *¿Qué es lo que se espera del LHC renovado?*

**R:** Sabemos que el modelo estándar funciona en el rango de energías y distancias en que trabajamos, pero sabemos que no es el modelo final de la naturaleza porque, entre otras cosas, es incapaz de incorporar una correcta descripción de la materia oscura o explicar la asimetría entre materia y antimateria en el Universo. Para superar este problema se han propuesto modelos alternativos como los llamados de supersimetría y algunos indicios podrían aparecer a partir del año próximo, cuando se ponga en marcha el LHC renovado, que casi duplica la energía del an-

terior, pero no hay garantías de que aporte las claves para ir hacia un modelo más completo. Tenemos el instrumento adecuado, que tanto nos ha costado construir, y nuestro trabajo es explorarlo y ver qué ocurre. En algún momento, subiendo en energía, el modelo estándar dejará de funcionar, pero no podemos decir si eso ocurrirá en el próximo paso. Sería muy emocionante que ocurriera, pero no se puede asegurar.

**P:** *¿Cómo se produciría ese descubrimiento?*

**R:** Pues buscando desviaciones de las predicciones del modelo estándar o efectos que predicen los modelos alternativos (supersimetría, dimensiones adicionales, tecnicolor, etc.). Por ejemplo, en el modelo estándar, el Higgs se acopla directamente a todas las partículas con masa e indirectamente a los que no la tienen. Se pueden medir los valores de estos acoplamientos y comparar los datos entre unos modelos y otros. Si tenemos bastante resolución podremos decir qué

leptónico, uno japonés, el ILC, y otro europeo, el CLIC, y otros dos circulares, el CEPC-SPPC en China o el FCC en el CERN. Esa sería la única manera de entender cuál puede definir la siguiente máquina de descubrimiento, un acelerador de mucha más energía.

**P:** Pero ya se están definiendo esas opciones y en Valencia ha habido una sesión específica sobre ello.

**R:** Se debatió sobre la estrategia a seguir los próximos 4 o 5 años, en los que hay que empezar a ejecutar el plan de actuación global que ahora se ha decidido para los nuevos aceleradores del periodo 2030-2050. Hay que trabajar con anticipación, porque un acelerador no se puede hacer de la noche a la mañana ni lo puedes comprar en un gran almacén. Cuesta mu-

chísimo tiempo, esfuerzo y expertos. Por ejemplo, los primeros estudios de diseño del LHC se hicieron en el 84-85, 20 años antes de entrar en funcionamiento, y se aprobó hacia 1995 o 1996. Lo que ha cambiado es que, como dijo Rolf Heuer, director del CERN, ahora existe una estrategia global en física de partículas. Hasta ahora había la estrategia americana, la europea y, aunque a otro nivel, la de los países asiáticos. En Valencia han estado los responsables de los diferentes laboratorios y comités y se ha avanzado en un planteamiento común. Ahora el reto es implementarlo en los próximos años.

**P:** Para definir esos futuros aceleradores habrá que saber lo que se busca ¿no?

**R:** Un proyecto de esta envergadura no se hace si no tienes un proyecto

científico relevante, con un trabajo definido a hacer, pero tienes que trabajar con un abanico de posibilidades y optimizarlas, tanto desde el punto de vista científico como tecnológico. No te puedes plantear una máquina que no sabes construir. Hay que resolver muchos problemas, tener los pies en tierra y que puedas no solo hacerlo, sino además pagarlo. Nuestros proyectos son muy caros y por eso hay que proyectarlos muy bien y optimizarlos al máximo. Y personalmente, como son proyectos que duran 20 o 30 años, pueden ocupar la mayor parte de la vida profesional de uno y no te la puedes jugar a una sola baza sin tenerlo muy claro. Los resultados pueden tardar 15 años en llegar desde que empiezas. ■

modelo es el adecuado. Y esa es la fase en la que entramos, y en la que vamos a necesitar mucha precisión, pues las diferencias son muy sutiles, ¡nada es fácil!

**P:** Hay mucho trabajo que hacer, vamos.

**R:** Muchísimo. Hay proyectos que van mucho más allá del LHC y que buscan conseguir mayor precisión. Con la fase de alta luminosidad del LHC (HL-LHC), hacia el 2022, se realizará un gran avance, pero en mi opinión seguramente aún dejará bastantes puertas abiertas a nuevos modelos e interpretaciones. Las diferencias entre los diferentes modelos teóricos son menores que la precisión que se tiene por ahora.

**P:** ¿Qué rango de energía alcanzará el HL-LHC?

**R:** Será más o menos el mismo, 13 o 14 TeV, pero aumentará la luminosidad, es decir, más datos y más detalle. En las máquinas hadrónicas el aumentar la luminosidad también permite tener más datos a mayor energía, ya que la verdade-

ra interacción no es la de los protones sino la de los partones (quarks y gluones) que los componen. No obstante el reto tecnológico para poder funcionar en estas condiciones es muy grande debido a la radiación y el aumento de ruido del haz.

*“Sabemos que el modelo estándar funciona, pero que no es la explicación final.”*

**P:** ¿Se podrán hacer más upgrades del LHC?

**R:** La fase HL-LHC será la última y permitirá seguir trabajando probablemente hasta 2030.

**P:** ¿Además del Higgs, qué otros temas han centrado la Conferencia?

**R:** Yo creo que no hay que olvidar al quark top, que siendo una partícula que, aunque se descubrió en el 95, sigue teniendo muchos misterios, como dijo Antonio Pich en su charla de conclusiones, hay muchas propiedades aún que medir. La relación entre el Higgs, el quark top y el bosón W aún tienen bastantes secretos que desvelar. La masa del W es una medida interesante que se va consiguiendo mayor precisión y es importante para ver desviaciones del modelo estándar.

**P:** ¿Según se acoten las medidas de los tres se reduce la incertidumbre?

**R:** Exacto. Así se van aclarando modelos y desechando algunos. Las diferencias entre estos modelos son menores que la precisión de los datos que podemos, por ahora, distinguir. Hay que aumentar la precisión de la medida de las masas, los acoplamientos y las interacciones para poder discernir la validez de un modelo. Por ejemplo, las predicciones

de desintegración del Higgs son diferentes en cada modelo y si tienes suficiente precisión puedes comprobarlas.

**P:** *¿Y eso se conseguirá con más energía o con más resolución y finura?*

**R:** La respuesta nunca es binaria en física, y aquí hay correlación entre energía y luminosidad, se consigue con más datos y con más finura. Hay una previsión de la mayor precisión que alcanzaremos en el LHC y en el HL-LHC, pero son estimaciones, hay que hacer la máquina y los detectores y cuando lleguemos veremos si somos capaces de llegar a esas previsiones. Las máquinas leptónicas (aceleradores donde chocan electrones y positrones), al ser partículas de mucha menor masa, ofrecen resultados más claros y, en principio, pueden alcanzar un factor 10 y, en algunos casos, hasta 100 veces mayor resolución que la que alcanzará el LHC a partir de 2022.

**P:** *El bosón W interviene en las reacciones nucleares, ¿su investigación puede tener alguna aplicación en el mundo de la energía nuclear?*

**R:** No creo. Es un bosón que participa en las reacciones por las que un neutrón se desintegra a protón, pero no veo una correlación. Investigamos al W a energías de 1 TeV y las reacciones nucleares son del orden de los MeV, un millón de veces menor.

**P:** *Todos esos modelos de supersimetría incluyen el modelo estándar, claro.*

**R:** Sí, porque si no quedarían descartados, ya que en el rango de energías al que lo probamos funciona impecablemente. Lo que hacen los nuevos modelos es ir más allá. Por ejemplo, algunos predicen cinco bosones Higgs; y uno de ellos sería el que hemos descubierto.

**P:** *¿Cuáles son los retos más importantes que afronta la física de partículas?*

**R:** Retos hay muchos, pero los más importantes en física de partículas son determinar la naturaleza de la materia oscura, explicar la asimetría materia-anti-

materia, y llegar a un modelo que incorpore la gravedad. Ninguna de esas tres cosas se puede describir con el modelo estándar que tenemos ahora y hay que buscar uno nuevo que lo consiga. Y como otros retos menores, estudiar a fondo los neutrinos, el top, los W y, por supuesto, el Higgs. Y digo menores porque al menos todas estas partículas sí están ya en el modelo estándar, pero profundizar en su conocimiento puede ser la clave para llegar al nuevo modelo.

**P:** *¿Hay candidatos para explicar la materia oscura?*

**R:** Sabemos que existe materia oscura por sus efectos gravitacionales, y que es cinco veces más abundante que la nor-



mal. Y si en la materia normal hay una gran cantidad de partículas distintas, en algo que es cinco veces mayor yo esperaría que también hubiera una variedad de partículas muy grande. No creo que lo que forme la materia oscura sea una sola clase, puede que se explique con diferentes tipos.

**P:** *Hace unos años se pensaba que los neutrinos podían explicar la materia oscura ¿Sigue vigente esa posibilidad?*

**R:** Yo creo que esa idea se tiene abandonada, aunque aún hay modelos que los incluyen. Podría tener alguna contribución, pero el sentido general es que al ser su masa tan pequeña y teniendo en cuenta los mecanismos de producción que tiene, no sería una parte sustancial.

**P:** *¿Los modelos de supersimetría incluyen candidatos a la materia oscura?*

**R:** Tienen candidatos, como los WIMP, que es un nombre genérico, no una partícula concreta, que significa *Weak Interaction Massive Particle* (Partícula Masiva de Interacción Débil), y los neutralinos, que podrían originar parte o toda la materia oscura.

**P:** *¿Y en el caso de la asimetría materia-antimateria?*

**R:** Sabemos que en el big-bang se originó tanta materia como antimateria, pero cuando miramos al Universo vemos que está hecho de materia y no se ve esa antimateria, no se detecta en ningún lugar y aún no entendemos por qué. Es lo que se estudia bajo lo que en nuestro lenguaje denominamos “violación CP”, por la cual la antimateria no se comportaría exactamente como la materia en algunos aspectos. Existe un campo, denominado física del sabor, que podría aportar pistas. Es difícil de resolver, pero la única manera que conocemos de adentrarnos en esa respuesta es mediante experimentos de física del sabor.

**P:** *Con tantos retos por resolver, ¿diría que estamos en un momento crucial de la física de partículas?*

**R:** Yo creo que es un momento excepcional, sí. Hace muchos años que no estamos en un momento así. Particularmente los próximos 4 o 5 años van a ser superexcitantes, por los canales de estudio que se abren con la nueva fase del LHC.

**P:** *¿Hay un punto final en este recorrido, en que podamos conocer y explicar definitivamente toda la física?*

**R:** No sé si llegará, lo que sé es que estamos aún muy lejos. Todavía queda mucho trabajo por hacer.

**P:** *No espera verlo*

**R:** No, yo no. Estoy convencido de que no lo veré. Si contribuimos en algún modo a hacer parte del camino ya estaría bien. Si llegamos a explicar algo de la



materia oscura ya sería mucho, me iría a la tumba con otra pregunta resuelta.

**P:** *La gran aportación de su generación es el Higgs, entonces.*

**R:** Perdón, pero mi generación aún no ha terminado. De momento es el Higgs, pero también todo lo que ha hecho el LEP (acelerador electrón-positrón que ocupó el mismo túnel que el LHC entre los años 1989 y 2000). Todo lo que sabemos del modelo estándar se sustenta en una veintena de mediciones esenciales y LEP ha proporcionado entre el 50 % y el 70 % de esas medidas. Y eso lo ha hecho también mi generación.

**P:** *¿Qué supone para los físicos españoles haber organizado este congreso?*

**R:** Creo que es un reconocimiento internacional a la labor que los españoles están haciendo, a su visibilidad y a su impacto en los últimos años. Aunque se haga en Valencia, el reconocimiento es a toda la comunidad española y así lo hemos entendido en la organización. El Comité Local no era solo de Valencia, sino que incluía a miembros de toda la comunidad española. Quisiera resaltar en este sentido la charla final, de resumen de la conferencia y prospectiva futura del campo. La suelen dar físicos muy

prestigiosos en el ámbito internacional y en esta ocasión la impartió un español, el profesor Antonio Pich.

**P:** *¿Y para usted en el plano personal?*

**R:** Ha sido una aventura personal gratificante en tanto que ha acabado bien. Me ha dado la oportunidad de conocer a personas extraordinarias, tanto nacio-

*“Los próximos 4 o 5 años van a ser superexcitantes, por los canales de estudio que se abren con la nueva fase del LHC”*

nales como extranjeras, y tanto del campo como de fuera, artistas, periodistas... También ha sido un esfuerzo enorme, que me ha obligado a enfrentarme a situaciones complicadas e intentar resolverlas y lo hemos hecho lo mejor que se ha podido. Me ha quitado muchas horas de sueño y ha tenido momentos muy

complicados, porque cuando calculas que van a venir 1.000 personas y a dos meses vista tienes solo unos 400 las noches se hacen muy largas. Tienes que prever la organización para esos 1.000 y los gastos los vas generando con las previsiones y son gastos grandes y si no vienen no sabes de dónde lo vas a sacar.

**P:** *Sobre todo en época de restricciones.*

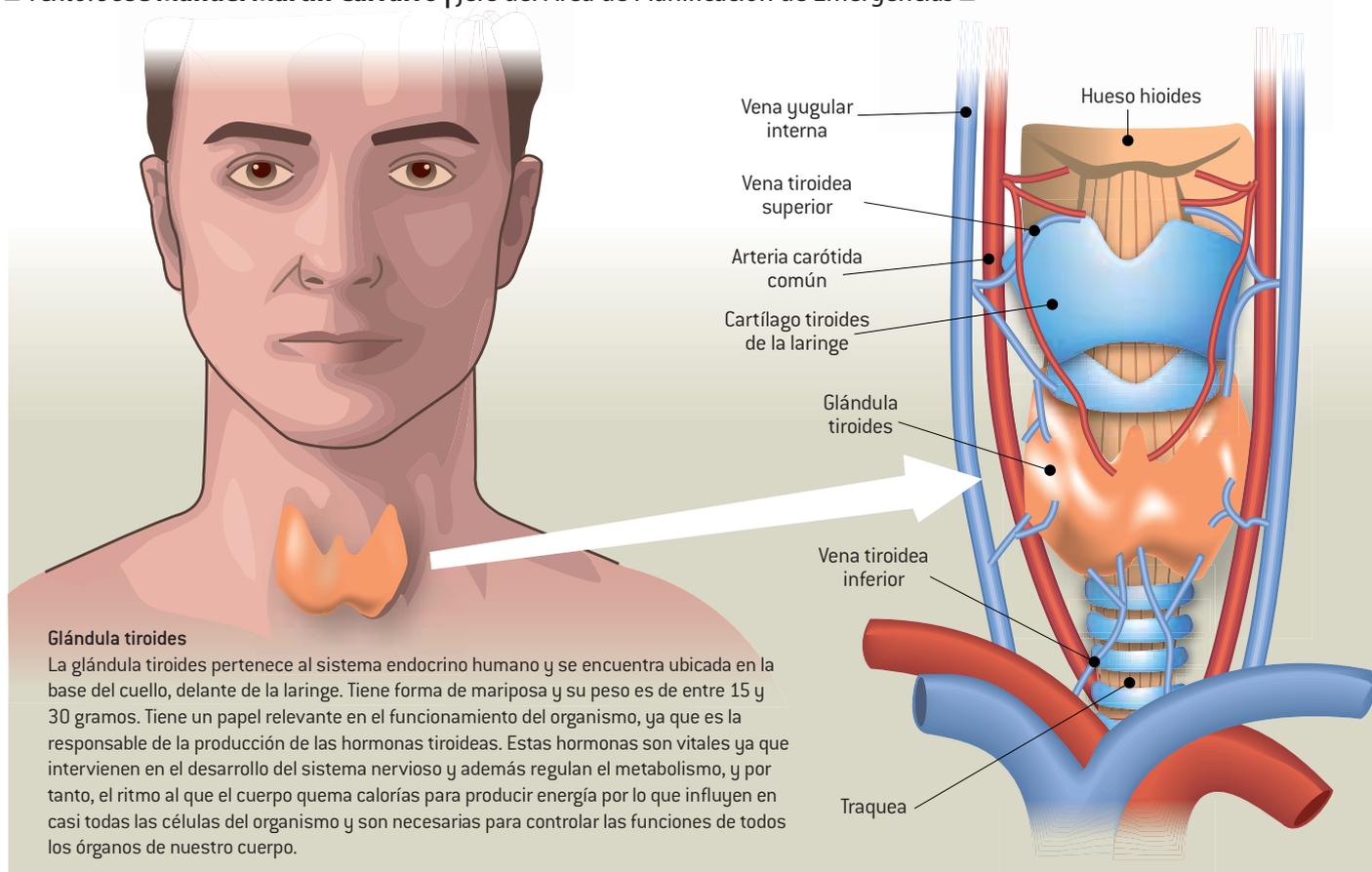
**R:** Nos hemos tenido que mover muchísimo, llamar a todas las puertas, tanto en España como fuera. Creo que hay gente que me huye por si voy a pedirle dinero otra vez... El número final de colaboradores, 18, no está nada mal, sobre todo para los tiempos que corren, y les estoy muy agradecido.

**P:** *¿El momento más complicado?*

**R:** Cuando me enteré de que François Englert (Premio Nobel de Física 2013 por el descubrimiento del mecanismo Brout-Englert-Higgs) no podía venir a dar la conferencia magistral apenas dos días antes de la fecha prevista. Menos mal que Alan Guth, cuya intervención también era muy esperada, respondió a los 15 minutos y aceptó sin problema. Al final creo que se siguió mucho a través de la retransmisión en directo por Internet, al menos tanto como si hubiera sido Englert. ©

# Bloqueo del tiroides con yodo estable

■ Texto: **José Manuel Martín Calvarro** | jefe del Área de Planificación de Emergencias ■



## Glándula tiroides

La glándula tiroides pertenece al sistema endocrino humano y se encuentra ubicada en la base del cuello, delante de la laringe. Tiene forma de mariposa y su peso es de entre 15 y 30 gramos. Tiene un papel relevante en el funcionamiento del organismo, ya que es la responsable de la producción de las hormonas tiroideas. Estas hormonas son vitales ya que intervienen en el desarrollo del sistema nervioso y además regulan el metabolismo, y por tanto, el ritmo al que el cuerpo quema calorías para producir energía por lo que influyen en casi todas las células del organismo y son necesarias para controlar las funciones de todos los órganos de nuestro cuerpo.

**E**n caso de accidente nuclear el yodo radiactivo es uno de los productos liberados al medio ambiente. El isótopo de más interés es el yodo-131, emisor beta-gamma, que tiene un periodo de semidesintegración de ocho días. Una vez inhalado o ingerido es absorbido por nuestra glándula tiroides que no diferencia el yodo estable del yodo radiactivo en la generación de hormonas fundamentales para nuestra vida.

Entre las medidas que contempla el Plan Básico de Emergencia Nuclear (Plaben) para la protección de la población en caso de accidente está la denominada “profilaxis radiológica”, esto es la in-

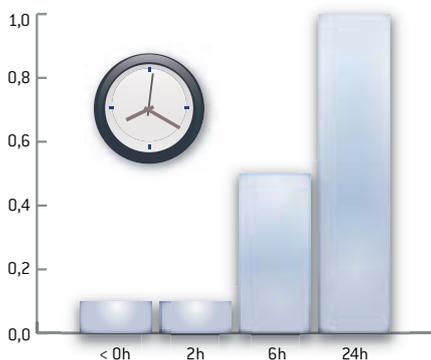
gestión de compuestos químicos estables del yodo en forma de yoduro o yodato potásico, con el fin de saturar la glándula y reducir la absorción selectiva del yodo-131, que puede provocar efectos deterministas o estocásticos en el normal funcionamiento de dicha glándula.

El Plaben contempla la profilaxis radiológica como una de las medidas urgentes de la zona I de planificación (área de 10 km). Dependiendo del tipo de vertido y de las condiciones meteorológicas, el CSN podría extender esta medida en algún sector de la zona II de planificación (corona circular entre 10 y 30 km). En principio esta zona II solo debería verse

afectada por las medidas a medio y largo plazo.

Para que la medida sea efectiva, es necesaria la ingesta de yodo estable antes de la incorporación de yodo radiactivo. La vía de incorporación más importante es la inhalación (70%), en menor medida (30%) la ingestión de leche o agua contaminadas con yodo-131.

El yodo está presente en nuestra dieta (microgramos). La profilaxis radiológica supone la ingesta de yodo en cantidades mil veces superiores a las habituales (miligramos). Estas dosis de bloqueo, generalmente únicas, no presentan efectos secundarios en la mayor



Reducción de la dosis de inhalación sobre el tiroides, dependiendo del tiempo pasado entre la exposición y la ingesta del comprimido.

**Tabla 1. Nivel de intervención para profilaxis radiológica**

Grupos de edad	Niveles de intervención
Recién nacidos, niños, adolescentes hasta los 18 años, mujeres embarazadas y madres lactantes	10 mGy (dosis equivalente evitable en tiroides)
Adultos 19-40 años	100 mGy (dosis equivalente evitable en tiroides)
Adultos > 40 años	500 mGy (dosis proyectada en tiroides)

En España el Plabem sólo establece un nivel de intervención, independientemente de la edad, en 100 mGy de dosis equivalente evitable al tiroides.

**Tabla 2. Dosis para la profilaxis radiológica**

Grupos de edad	Dosificación de yoduro potásico (mg)	Medicamento (vía oral)
Adultos y adolescentes mayores de 12 años	130 mg/día	Una cápsula
Niños de 3 a 12 años	65 mg/día	1 ml de solución
Niños de 1 mes a 3 años	32 mg/día	0,5 ml de solución
Recién nacidos (de 0 a 1 mes)	16 mg/día	0,25 ml de solución



parte de la población y, en caso de haberlos, revisten escasa importancia. La eliminación del yodo es lenta y se realiza por vía urinaria. En la tabla 1 se recogen los niveles de intervención que justifican el empleo de yoduro potásico, y en la tabla 2, las dosis de yoduro potásico para los diferentes grupos de edad.

En la actualidad la preparación del yoduro potásico para la profilaxis radiológica está a cargo del Centro Militar de Farmacia de la Defensa, en forma de cápsulas de gelatina dura, que se presentan en un blíster de 10 cápsulas, o en solución oral en envases de 20 ml con jeringa dosificadora. El yoduro potásico estable debe ser sumi-

nistrado previamente a la exposición al yodo-131. En la ilustración (o, en la infografía) se muestra la reducción de la dosis por inhalación. Podemos observar que, para tiempos inferiores a dos horas, el factor de reducción de dosis es del 90 %; si el tiempo transcurrido es superior a seis horas, el factor reductor disminuye al 40 %.

Para poder suministrar rápidamente el yoduro potásico al personal afectado, en nuestro país existe una predistribución del yoduro potásico en las zonas I de planificación, esto es: en un área de radio de 10 km en torno a la central nuclear.

Existen tres niveles de almacenamiento. El primero está en las propias

centrales nucleares, el segundo en los centros médicos y puestos de la Guardia Civil de la zona I y el tercero en las subdelegaciones. Dentro de la zona I de planificación también existe un tercer nivel de almacenamiento que se concentra en ayuntamientos, áreas sociales, farmacias y centros de reunión.

El CSN establece los criterios radiológicos y recomienda la profilaxis radiológica; el Grupo Sanitario es el encargado del suministro a los grupos de población y, como es un medicamento, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias es la responsable de su almacenamiento y renovación periódica. ©

Colocación de un segmento de la losa del edificio que albergará el tritio, el pasado mes de junio.



Se acelera la construcción del reactor experimental de fusión nuclear magnética ITER, tras años de retrasos

## La máquina que imitará al Sol emerge de la Tierra

Con un presupuesto de unos 15.000 millones de euros, las obras del reactor experimental internacional de fusión ITER avanzan en Cadarache (Francia) para intentar que la máquina entre en funcionamiento a partir de 2022 y pueda demostrar que la fusión nuclear es una fuente de energía limpia e inagotable. Tras superar los problemas de financiación, el pro-

yecto se enfrenta a otros obstáculos menores: las marejadas de la geopolítica mundial, como el conflicto de Ucrania, la posible utilización de materiales inadecuados por falta de ensayos previos y el guirigay que supone la convivencia de las diferentes tradiciones industriales de los países socios. ■ Texto: **Manuel Ansedé** | periodista científico, redactor de *Materia* ■

“La fusión nuclear es la energía del futuro y siempre lo será”. El físico español Carlos Alejaldre está un poco cansado de este chascarrillo que circula desde hace años en su sector. Desde su despacho de director general adjunto del reactor experimental internacional de fusión ITER, en Cadarache (Francia), el investigador puede ver que ese futuro no es utópico y ya está a tiro de piedra. “El ITER se encuentra en un momento muy avanzado de su construcción, no solo respecto a la obra civil, que tengo delante de mis ojos, sino también en cuanto a los componentes de alta tecnología”, explica por teléfono.

Si todo va bien, el reactor demostrará a partir de 2022 que es posible técnica y científicamente recrear en la Tierra los procesos que generan una cantidad descomunal de energía en el Sol y en el resto de estrellas. En el ITER, los científicos intentarán lograr la fusión de átomos de hidrógeno a temperaturas extremas, de unos 150 millones de grados, obteniendo muchísima energía en el proceso. A esa temperatura, la materia forma una sopa de partículas, el plasma, que se confina en un reactor con forma de rosquilla, el llamado tokamak, gracias a fuertes campos magnéticos.

“Antes de 2022 es muy difícil que sea posible empezar”, reconoce Alejaldre, que trabaja ahora en la elaboración de un calendario realista tras acumular años de retrasos debido a los vaivenes de la financiación. Sin embargo, el físico español es optimista. “El 89,6 % del valor de los componentes ya ha sido contratado a las agencias nacionales” que se encargarán de su construcción, explica. Son centros de investigación y empresas de alta tecnología de la Unión Europea, EEUU, Rusia, Japón, China, India y Corea del Sur, los países que sostienen el proyecto ITER.

Históricamente, el dinero ha sido el principal escollo de los científicos que



El 27 de agosto se terminó la plataforma donde se sienta el reactor.

trabajan en el diseño y construcción del reactor experimental. Sin embargo, “ahora mismo no hay ningún problema de financiación previsto”, según Alejaldre. “La participación europea ha pasado de 2.700 millones de euros en 2006 a 6.600 millones”, detalla.

El propio presidente de la Comisión Europea, el portugués José Manuel Durão Barroso, reafirmó este compromiso el 21 de julio de este año, durante una visita a las obras del ITER. “La Comisión Europea está orgullosa de haber creído en este proyecto”, proclamó ante los trabajos del

Complejo Tokamak, una de las partes clave del reactor experimental. Su construcción requerirá 110.000 metros cúbicos de hormigón, una cantidad con la que se podrían levantar 3.000 viviendas de 120 m<sup>2</sup>, según los cálculos de la UE. Bajo los pies de Barroso se encontraba el medio millar de pilastras, ya instaladas, que soportarán el peso de la máquina, unas 23.000 toneladas, el triple del peso de la Torre Eiffel.

Hasta septiembre de 2014, los operarios se han centrado en el bloque de hormigón que funcionará como base para el tokamak. Son 15.000 m<sup>3</sup>

de un hormigón que es constantemente monitorizado para evitar cualquier resquebrajadura. Sobre el hormigón ya destacan las barras verticales que servirán como esqueleto de los muros del complejo, cuya erección comenzó en julio. Y los obreros también han dispuesto las barras de acero



Detalle de los cables superconductores que envuelven el anillo toroidal. El tubo central alberga el helio líquido que enfría los cables.

que reforzarán la parte central de la base del tokamak. Son 6.000 toneladas de acero repartidas en finas barras de 12 metros de longitud. Además, el área dedicada a las empresas contratistas está muy avanzada, con el restaurante, el aparcamiento y algunos edificios de oficinas ya terminados.

La filial de construcción de Ferrovial, Ferrovial Agroman, por ejemplo, ya tiene sus oficinas levantadas en Cadarache. La empresa española participa con un 30 % en el consorcio completado por las francesas VINCI (58,3 %) y Razel-Bec (11,7 %) para levantar el Complejo Tokamak y construir nueve edificios auxiliares del ITER. Estas obras, con un valor de unos 300 millones de euros, comenzaron en otoño de 2013.

El contrato incluye el edificio principal, una enorme estructura de hormigón de 120 metros de largo, 80 metros de ancho y otros 80 de alto. Y también contempla la instalación de puertas antirradiación, resistentes a la presión. Cada una de ellas tendrá cuatro metros de altura, cuatro de ancho y pesará unas 40 toneladas.

El proyecto ITER nació en una cumbre de superpotencias celebrada en Ginebra (Suiza) en noviembre de 1985. Entonces, tras unas conversaciones entre el presidente francés, François Mitterrand, y la primera ministra británica, Margaret Thatcher, el secretario general del Partido Comunista de la Unión Soviética, Mijaíl Gorbachov, propuso al presidente estadounidense, Ronald Reagan, impulsar un proyecto común de fusión nuclear con fines pacíficos. El diseño comenzó en 1988 y fue finalmente aprobado por los países miembros en 2001. En aquel momento, se hablaba de un coste de construcción de 4.700 millones de euros, pero sucesivos rediseños y, sobre todo, el encarecimiento de las materias primas con la crisis económica, han disparado el presupuesto.

“La UE pone 6.600 millones de euros y le corresponde el 45 % del proyecto, así



Arriba, transporte de grandes piezas del ITER. A la derecha, el presidente de la Comisión Europea, Jose Manuel Durão Barroso, durante su visita a las instalaciones en julio.



que podemos calcular que el presupuesto total es de unos 15.000 millones de euros”, estima Alejaldre. “Si comparas esta cifra con lo que estamos gastando en petróleo, a lo mejor representa una semana de consumo en Europa”, matiza.

Al margen del dinero, Alejaldre reconoce otros escollos. “Esto es un macroproyecto. Cualquier cosa que sucede en el mundo, como el actual conflicto en Ucrania, tiene repercusiones. Teníamos una reunión de los socios del proyecto en San Petersburgo y EEUU no quiso venir”, señala. “También, por ejemplo, el terremoto de 2011 en Japón afectó a edificios de empresas que hacían componentes para el ITER. Esto también significó retrasos”, añade.

Sin embargo, el director general adjunto del reactor experimental está convencido de que pronto la fusión nuclear demostrará que es la energía del futuro. El objetivo del ITER es generar unos 500 MW de energía, una cantidad 10 veces mayor que la energía que requerirá su puesta en funcionamiento. Si lo consigue, el siguiente paso será la construcción de una planta de demostración, denominada DEMO, para comprobar que es posible producir electricidad de manera eficiente y a gran escala y a un pre-

## Un reactor “inherentemente seguro”

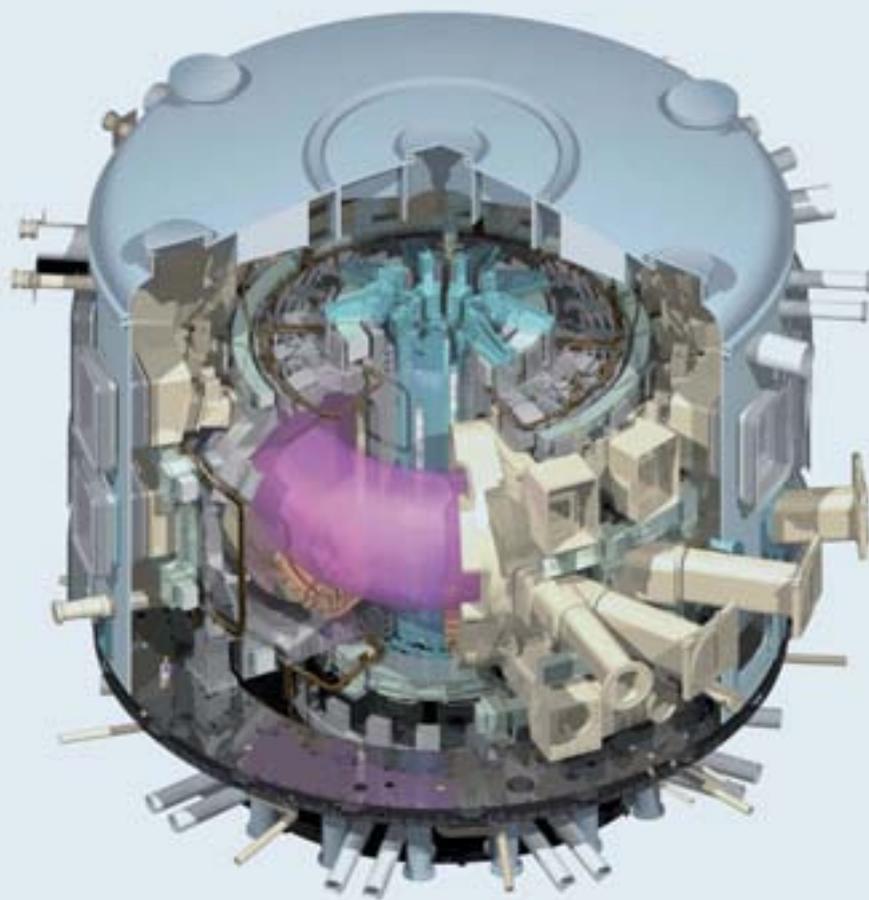
El físico Carlos Alejdre suele decir en broma que el ITER es tan seguro que podrían contratar al personaje de dibujos animados Homer Simpson para operarlo. Otro físico español que ha participado en su diseño, Francisco Castejón, corrobora su seguridad. “El ITER es inherentemente seguro. No es una reacción en cadena. Si ocurre el peor desastre que te puedas imaginar y algo falla, la reacción se interrumpe, el plasma se apaga y el calor residual no es suficiente para fundir nada, como sí ocurrió en la central nuclear de Fukushima”, asegura.

La reacción en sí solo genera helio, el gas inofensivo que se emplea para llenar los globos de los niños. La única preocupación en cuanto a la seguridad del reactor, sostiene Castejón, sería un escape de tritio, uno de los tipos de átomos de hidrógeno empleados para la fusión nuclear. El tritio es un gas radiactivo, que se fabricará en el propio ITER a partir de litio, así que no supondrá riesgos en largos transportes. “Podría haber una fuga de tritio, pero es muy ligero e inmediatamente ascendería. Ni siquiera habría que evacuar a la población cercana”, remacha Castejón, que además de físico del Ciemat es portavoz para temas nucleares de la ONG Ecologistas en Acción. ▶

cio competitivo a partir de la fusión nuclear. DEMO utilizará muchos de los componentes que se pondrán a prueba en el reactor experimental ITER. Y, tras esta demostración, habrá luz verde para construir reactores comerciales de fusión nuclear.

En 1997, el experimento Joint European Torus (JET), próximo a Oxford (Reino Unido), produjo 16 megavatios de energía a partir de la fusión de átomos de hidrógeno, pero requirió más energía para generarlos. Asimismo, la Instalación Nacional de Ignición, un centro de investigación militar situado en Livermore (California, EEUU), anunció en 2013 que había conseguido por primera vez que la energía producida en una pequeña cápsula con hidrógeno fuese mayor que la utilizada para comprimir esa materia. La comunidad científica internacional redujo posteriormente la importancia del logro, cuya eficiencia energética fue exagerada en los medios de comunicación. El ITER será, por lo tanto, la primera máquina de fusión que producirá energía neta.

Los científicos que trabajan en el reactor experimental están obsesionados con demostrar que la fusión nuclear como fuente de energía limpia e inagotable no es ciencia ficción. En los vídeos de presentación del proyecto ITER abundan citas históricas con un hoy sonrojante escepticismo hacia la ciencia de vanguardia. “¿Qué puede ser más palpablemente absurdo que la perspectiva de tener locomotoras que viajen dos veces más rápido que las diligencias?”, se preguntaba en 1825 la revista londinense *The Quarterly Review*. “Máquinas voladoras más pesadas que el aire son imposibles”, afirmaba por su parte Lord Kelvin, presidente de la Royal Society de Londres, en 1885. “Los viajes espaciales son una absoluta sandez”, sostenía en 1956 el astrónomo británico Richard van der Riet Woolley. “Nosotros esperamos demostrar que la



Estructura interna del reactor de fusión nuclear magnética ITER.



Izquierda, para avanzar en la construcción se trabaja también de noche. Abajo, vista aérea del estado de la construcción en la primavera de 2014.



fusión nuclear es una fuente de energía viable”, zanja Alejaldre.

“Lo importante es que el proyecto ya está definido. No hay ningún problema técnico que se pueda interponer entre nosotros y el ITER. El único escollo principal es el dinero. Si se invierte más, se acelerará el proceso”, opina Francisco Castejón, otro físico español que ha participado en el diseño del reactor experimental.

Castejón, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), señala, sin embargo, los posibles problemas técnicos que quedan por delante. Uno de ellos podría ser la utilización de materiales inadecuados. Actualmente, no existe ninguna instalación en el mundo para simular las

condiciones que se darán en el interior de un reactor de fusión. Para ello, se está construyendo en Rokkasho (Japón) una fuente de neutrones de alta intensidad, con características similares a la del proyecto ITER.

El centro, denominado Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF), tiene como responsable al ingeniero español Juan Ramón Knaster, veterano del Ciemat y de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), donde participó en la construcción del Gran Colisionador de Hadrones, el anillo subterráneo de 27 km de circunferencia construido en la frontera entre Francia y Suiza donde se observó el célebre bosón de Higgs.

El IFMIF se considera indispensable para el desarrollo de la fusión nuclear comercial, pero no llegará a tiempo para probar los materiales empleados en el ITER. En un principio, se planteó el inicio de su construcción en 2015 y su entrada en operación en 2020. Se utilizará para certificar los materiales candidatos a ser utilizados en el futuro reactor DEMO.

Castejón lo considera un obstáculo menor. “En el ITER, si falla un material, lo cambias, porque al fin y al cabo es un experimento. Pero en un reactor comercial no te puedes permitir ese lujo”, apunta. Otro problema, explica, es el confinamiento del plasma a 150 millones de grados centígrados, un proceso en cuya mejora están trabajando los mejores superordenadores del planeta.

Finalmente, apostilla Castejón, “el ITER es un experimento científico, pero también sociológico y político”. El trabajo conjunto de la Unión Europea, EEUU, Rusia, Japón, China, India y Corea del Sur puede suponer ventajas, pero también inconvenientes, a juicio del físico. “Un país fabrica una bobina, otro país se ocupa de otra bobina teóricamente igual, otro hace un sector de la cámara de vacío, otro país fabrica otro diferente. Y cada país tiene sus tradiciones industriales. Te encuentras a un ingeniero ruso hablando con un ingeniero chino, cada uno con sus sistemas de medida. Esto también puede retrasar el proyecto”, opina.

Pero los políticos parece que también empiezan a creer en el éxito del ITER. La ministra de Educación Superior e Investigación de Francia, Geneviève Fioraso, lo dejó claro durante la visita de Durão Barroso el 21 de julio. “Europa ha sido lo suficientemente valiente como para lanzarse a este proyecto. Europa es hermosa cuando es audaz”, proclamó. “Gracias a este proyecto, Europa es un continente muy joven y ambicioso”. ©

# Reacción en cadena

## NOTICIAS

### Baterías de arena

El silicio es el rey de la tecnología electrónica, pero en algunos componentes, como los ánodos de las baterías de los aparatos portátiles, deben utilizarse otros materiales, principalmente grafito. El problema del silicio es que se hincha al calentarse durante el proceso de recarga, pero a Zachary Favors, un estudiante recién graduado, se le ocurrió una posible solución mientras paseaba por la playa de San Clemente, en California, para usar silicio y conseguir baterías que aguanten más tiempo entre carga y carga, ya que el grafito no ofrece la capacidad suficiente para atender la creciente demanda de mayor potencia de los móviles de última generación.

Tras purificar una muestra extraída de la arena de la

playa, Favors inició el proceso de cristalización, intentando mantener una temperatura constante en torno a 801 grados. Para ello utilizó otra sustancia típica de la playa, el cloruro sódico del agua marina, que ayuda a eliminar parte del calor generado por la reacción, evitando que sobrepasase el punto de fundición del silicio. Esto no habría sido posible si el proceso se hubiera llevado a cabo mediante el horneado tradicional con carbono, que requeriría una temperatura de exposición de 2.000 grados.

Los resultados han sido publicados en *Nature Scientific Reports*, y Favors destaca que los ánodos conseguidos logran triplicar la duración de las baterías, con un material barato, no tóxico y respetuoso con el medio ambiente. ▸



### El animal terrestre más grande de la historia era argentino

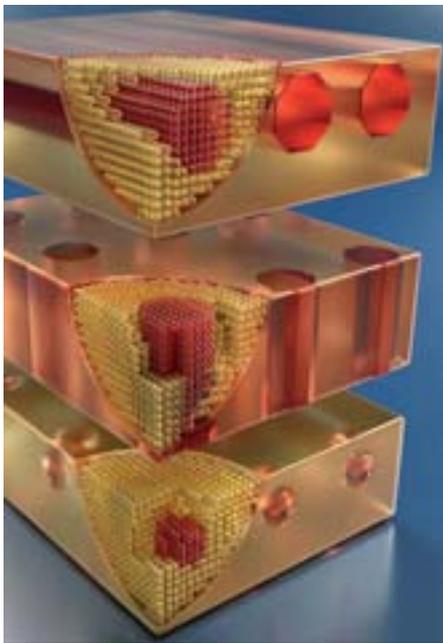
Un dinosaurio, cuyos restos fueron excavados por un equipo de investigadores de la Universidad de Drexel en Filadelfia (Pensilvania, EE UU) entre 2005 y 2009, parece ser el más grande que haya pisado jamás el suelo terrestre. Tras reconstruir el esqueleto del animal, han establecido que medía 25,9 metros de longitud y pesaba unas 65 toneladas, el equivalente a una docena de elefantes africanos adultos.

Bautizado como *Dreadnoughtus schrani* (el que nada teme) por sus descomunales dimensiones, vivió hace 77 millones de años, durante el Cretácico superior, en la Patagonia argentina y pertenece a un grupo de grandes herbívoros conocidos como titanosaurios. Aunque ya se habían sido descubiertos más dinosaurios de estas características con anterioridad, el *Dreadnoughtus* ha ofrecido a los científicos el esqueleto más completo que se ha encontrado de su tipo hasta la fecha, lo que ha permitido determinar su talla y peso. El estudio ha sido publicado en la revista *Scientific Reports*.

Según los investigadores, "los titanosaurios son un grupo notable de dinosaurios, con especies que tenían el peso de una vaca, el de un cachalote e incluso superior. Los más grandes titanosaurios han sido un misterio hasta ahora, porque en casi todos los casos sus fósiles eran muy incompletos. El *Dreadnoughtus* es con diferencia el mejor ejemplo que tenemos de las criaturas más gigantescas que hayan caminado sobre la tierra". ▸

## Imágenes médicas sin rayos X

Científicos de la Universidad de California, en Santa Barbara, han desarrollado un prometedor dispositivo capaz de obtener imágenes en alta resolución del interior del organismo sin emplear radiaciones ionizantes, multiplicar la eficiencia de los dispositivos



fotovoltaicos y mejorar la transmisión de grandes cantidades de información a alta velocidad.

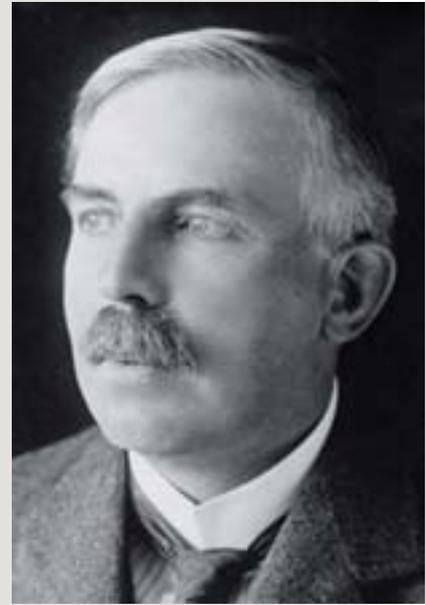
La clave se encuentra en un compuesto de erbio y antimonio con el que se forman nanocables semimetálicos que van incrustados dentro de una estructura semiconductor de antimonio de galio. La disposición de los átomos permite polarizar la radiación electromagnética en un amplio espectro del infrarrojo, lo que, según los investigadores, hace posible obtener imágenes del interior de estructuras de una gran variedad de materiales, incluido el cuerpo humano, sin los riesgos asociados a los rayos X. ▶

La disposición de los átomos permite polarizar la radiación electromagnética en un amplio espectro del infrarrojo, lo que, según los investigadores, hace posible obtener imágenes del interior de estructuras de una gran variedad de materiales, incluido el cuerpo humano, sin los riesgos asociados a los rayos X. ▶

## EFEMERIDES ▶ HACE 100 AÑOS...

### Se descubrió el protón

Protón, que viene de la palabra griega "primero", fue el nombre escogido por Rutherford al llegar a la conclusión, en 1914, de que en los núcleos de los átomos de hidrógeno no existían partículas positivas más pequeñas que estas. Estas investigaciones llevaron al físico a pensar que todos los núcleos estaban formados por la misma cantidad de protones y electrones, haciendo que los segundos neutralizaran a los primeros y consiguiendo así una primera percepción del átomo. Posteriormente, esta imagen fue modificada al proponerse que el núcleo está formado por protones y por neutrones, que carecen de carga eléctrica. El número de protones determina el elemento químico y el de neutrones el isótopo. ▶



## LIBROS

### *Tesla. Inventor de la era eléctrica*

W. Bernard Carlson

Editorial Planeta. Barcelona, 2014

La vida cotidiana de nuestra sociedad no sería tal como la conocemos si no fuera por las contribuciones de Nikola Tesla (1856-1943) a la revolución tecnológica del siglo XX. Sus inventos y patentes formaron la base de la electricidad de corriente alterna, campo en el que trabajó durante toda su vida y que gracias al cual la televisión y la radio, entre otras, tomaron un gran impulso. Al igual que su competidor, Thomas Edison, Tesla formó parte de la élite científica de su tiempo, siendo aclamado por una sociedad que vivía con entusiasmo la revolución tecnológica y seguía cada invención en los famosos *shows* que organizaba, envueltos en magia y luces. Este afán por promocionarse le valió el so-



brenombre de "genio excéntrico", que le acompaña hasta nuestros días. En *Tesla. Inventor de la era eléctrica*, el autor, W. Bernard Carlson, un distinguido historiador de la tecnología, relaciona a Tesla con la cultura de su tiempo. Indagando en su correspondencia, registros de negocios, testimonios legales, publica-

ciones y aparatos que perviven, Carlson reconstruye la vida y aportaciones de este visionario inventor que cambió el mundo. ▶

## Exposición “Libros inmortales, instrumentos esenciales”

Hasta el 14 de diciembre de 2014

**Museo de las Ciencias  
Príncipe Felipe de  
Valencia  
Avda. del Profesor  
López Piñero, 7,  
Valencia**

Desde los albores de la civilización han corrido en paralelo los avances tecnológicos, la inventiva, y su explicación y registro por escrito, por lo que los libros siempre han acompañado a las labores investigativas de todos los científicos. Así, el compás de Euclides y el astrolabio de Pto-



lomeo, por ejemplo, fueron plasmados en pergaminos antes de adquirir su forma.

Este paralelismo entre invención y manifestación escrita es lo que recoge “Libros inmortales, instrumentos esenciales”, una exposición producida por el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (Muncyt) y que presenta

valiosas obras acompañadas de instrumentos científicos históricos, realizando un recorrido por los hitos más importantes desde los tiempos de Hipócrates y sus instrumentos de medicina de la época romana, hasta el desarrollo de la genética a partir de las investigaciones de Thomas Morgan y la mosca de la fruta. La exposición consta de 26 obras fundamentales organizadas en módulos, presentes gracias a la colaboración de diferentes instituciones como la Biblioteca Nacional de España, el Real Instituto y Observatorio de la Armada, la Real Academia Española y la Universidad Complutense de Madrid. ▶

## EN RED

### Dos milenios de migraciones culturales en 5 minutos

Los movimientos migratorios han existido siempre, al menos desde hace dos millones de años, cuando se produjo la expansión del *Homo erectus*, pero se han ido intensificando a lo largo de la historia, lo que ha supuesto también una movilidad cultural. Un equipo de investigadores de instituciones europeas y estadounidenses, liderado por Maximilian Schich, de la Universidad de Texas (EE UU), ha diseñado una herramienta de análisis sobre la movilidad cultural en Europa y en Norteamérica. Se trata de un video-mapa construido con datos de más de 120.000 perso-



nas notables, que se ha publicado en la revista *Nature* y revela los movimientos culturales conectando los lugares de nacimiento y muerte de cada uno de esos individuos. Una de las conclusiones del estudio es que, a pesar de la dependencia que las artes tienen del dinero, los centros culturales y económicos no

siempre coinciden, y que el tamaño de una población no necesariamente está relacionado con su atractivo cultural. Para acercarse a este trabajo se puede ver el video-mapa, de unos cinco minutos de duración, en <http://www.nature.com/nature/videoarchive/charting-culture/index.html> ▶

## REDES



### Numberphile

Un canal dedicado a la divulgación de las matemáticas, que inició su emisión el 11/11/11 y está dirigida por el periodista Brady Haran. Cada vídeo está dedicado a un número concreto.



### Hoja de Router

Noticias, análisis, recomendaciones, curiosidades y humor sobre tecnología, Internet, redes sociales y telefonía móvil.



### @FECYT\_ciencia

Twitter oficial de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, en la que publican información institucional y agenda de eventos.



### @NASA

La actividad de la NASA en tiempo real, a través de imágenes del Universo hasta fotografías de la Tierra, pasando por sus naves y el equipo que las habitan. ▶

La actividad de Empresarios Agrupados ha pasado de la fisión a la fusión y de ahí a los grandes telescopios

## Del núcleo atómico al Universo

Nacieron como un deseo y una necesidad, la conjunción surgida en años en los que se construían centrales nucleares en España y se pretendía que la ingeniería nacional aprendiera, y participara, de unas obras intensivas en tecnología e inversiones. Tras el periodo de aprendizaje llegaron la madurez y la necesidad de encontrar nuevos mercados contando con una experiencia como la suya. Eso les ha llevado, por una parte, a recorrer el camino que va de la energía nuclear de fisión a la de fusión. Por otro lado, la precisión y la calidad de sus trabajos les han permitido diversificarse y encontrar un hueco notable en el mundo del espacio y los telescopios, un universo muy competitivo en el que la precisión del diseño se mide en centésimas de grado.

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



Central nuclear de Almaraz.

**E**n 1971, en plena época de construcción de las centrales nucleares españolas, una serie de compañías decidieron que querían tener su propia empresa para llevar a cabo los proyectos de construcción de las centrales, lo que en inglés se llama *architect engineer*, es decir, una organización capaz de encargarse de la integración de suministros y de llevar el proyecto en su conjunto, una ingeniería responsable que fuera adquiriendo sus capacidades en las primeras centrales construidas para tener cada vez un papel más relevante en la construcción. “La experiencia fue un éxito, y en la última de las centrales construidas en España, Trillo, la participación española en el conjunto de la obra fue del 86 %”, dice María Teresa Domínguez, física “de la rama fundamental”, que en-

tró en Empresarios Agrupados (EA), en 1974, tras completar una diplomatura en tecnología nuclear en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, el mítico MIT. “He estado aquí toda mi vida laboral y ahora soy directora de Proyectos Nucleares Avanzados.”

Además de su trabajo en la empresa, Domínguez ha sido presidenta de la Sociedad Nuclear Española y del Foro de la Industria Nuclear Española, y “en Europa quizá lo más relevante es que he participado en el Advisory Group on Energy de la Unión Europea”.

La empresa participó en la construcción de “Almaraz 1 y 2, Trillo, Cofrentes y Valdecaballeros 1 y 2. Trabajábamos en la cadena de suministros, que ya era incipiente en los años 80, para ayudar a implantar sistemas de calidad para ofer-

tar a estos proyectos, que tenían unos requisitos especiales, muchos de ellos ahora son más comunes en la industria, pero entonces no lo eran.” Es decir, se trataba de conseguir que las ofertas españolas fueran competitivas, en todos los sentidos, con las de otros países para hacer las centrales nucleares nacionales, sobre todo en seguridad y garantía de calidad. La cuestión, en definitiva, era trasladar el modelo de EEUU a la industria española, lo que posteriormente permitió a esa misma industria ser competitiva en todo el mundo.

Actualmente, Empresarios Agrupados participa en cinco grandes áreas de proyectos: energía, espacio, grandes infraestructuras, telescopios y simulación de sistemas. En todas estas áreas desarrollan desde la ingeniería conceptual a la de de-



En colaboración con la Société Européenne de Propulsion, la empresa trabajó en la simulación del funcionamiento de los motores Viking que impulsan al Ariane 5.

talle en todas las disciplinas de ingeniería y diseño y con herramientas continuamente en evolución, incorporando los avances más recientes. Está presente ofreciendo sus servicios de ingeniería y consultoría en más de 37 países.

### **Abiertos al mundo**

Cuando el programa nuclear español de nuevas construcciones paró, Empresarios Agrupados se había convertido en una ingeniería potente que necesitaba encontrar otros campos de trabajo, sin olvidar el nuclear español. “Sigue siendo muy relevante para nosotros”, dice Domínguez. “De hecho, más del 10 % de nuestro personal todavía se dedica al apoyo a las centrales nucleares españolas. Estamos convencidos de que la energía nuclear tiene cabida en Espa-

ña si se mantiene la excelencia en la ingeniería.” En el año 2001, cuando se iniciaron la operación de Almaraz y de Trillo, se creó un grupo dentro de la empresa, “compuesto por unas 300 personas que trabajan integrados con la propiedad de las centrales para apoyar a la operación de las tres unidades: Almaraz I y II y Trillo. Todavía es un área que cuidamos con esmero”, asegura Domínguez. También colaboran con algunas otras centrales, como Vandellós, Cofrentes y Garoña, en proyectos concretos.

En 1992 se creó Empresarios Agrupados Internacional, una división nacida con la idea de salir al mercado internacional aportando la experiencia nuclear adquirida. “Hemos participado en los programas TACIS y PHARE de mejoras en las centrales del este de Eu-

ropa y también en la construcción de nuevas centrales, en actividades de selección de tecnología y estudios de emplazamiento para la construcción de nuevas centrales en Finlandia, Turquía, República Checa, Lituania, Suiza y otros países.” “En general,” asegura Domínguez, “estamos en casi todos los países que quieren afrontar la energía nuclear haciendo trabajos de consultoría en lo que llamamos actividades previas a la construcción, preparación de ofertas, evaluación de contratos, estudios previos para la cadena de suministros, estudios previos de emplazamiento..., es decir, para todo tipo de trabajos incipientes. El programa europeo está un poco ralentizado, pero allí donde hay proyectos mantenemos nuestra presencia como consultores, incluidos EEUU, la mayo-

ría de los países del Este, México, Argentina, Brasil, Sudáfrica...

En este sentido, “fue para nosotros muy importante, —asegura Domínguez— el proyecto de Reactores Avanzados que se lanzó en España con el Ministerio y las compañías eléctricas en los noventa. Ese proyecto nos abrió el camino de participación en reactores avanzados, tanto de General Electric (SBWR y ABWR) como de Westinghouse (AP 600 y AP1000). Esto nos facilitó tener una participación importante en el proyecto de Lungmen, en Taiwan.” Hasta su reciente puesta en marcha han estado haciendo trabajos para General Electric, dentro de este proyecto, en todas las áreas (instrumentación y control, tuberías, diseño de sistemas mecánicos, etc.) y han participado notablemente en la certificación del diseño del ESBWR, “un sistema pasivo actualmente previsto para su construcción en el emplazamiento de North Anna. Es un reactor de 1.550 MW frente a los 650 del anterior (SBWR), que incorpora circulación natural y sistemas de seguridad pasivos.

Para llegar aquí ha sido importante dedicar un gran esfuerzo a la innovación. “Para nosotros es una pieza clave”, dice Domínguez. “Hemos participado aproximadamente en 30 proyectos de los programas marco de la UE, proyectos nucleares de todos los tipos, para la generación 4. Como consecuencia de eso acabamos de recibir el contrato para participar en el proyecto Myrrha.” Este proyecto, en el que participan junto a Areva y Ansaldo, está financiado por el Gobierno belga y se trata de construir un reactor nuclear dotado con un acelerador de protones para demostración de tecnologías futuras y para la producción de fuentes radiactivas de uso médico. Se instalará en Mol, Bélgica, y la idea es hacer “un prototipo para una demostración de la tecnología.”

Por lo que respecta a la última parte del ciclo, Empresarios Agrupados ha par-



Central nuclear de Temelin, en la República Checa.

ticipado con Enresa en el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de combustible y recientemente, ha sido adjudicatario del contrato de ingeniería para la construcción del ATC en Villar de Cañas, Cuenca. También en los desmantelamientos Empresarios Agrupados tiene experiencia internacional; los proyectos de la central de Bohunice, en Checoslovaquia, y la de Kozloduy, en Bulgaria, son un ejemplo.

### Otras energías

Más allá de todo lo relacionado con la energía nuclear, desde mediados de los años noventa, Empresarios Agrupados empezó a trabajar en otras plantas productoras de energía. En concreto, en ciclos combinados de gas “con una estrategia fuerte”, dice Domínguez.

De hecho, cerca del 60 por 100 de los ciclos que hay en España los hemos hecho nosotros”. Y ese conocimiento lo han llevado también a la construcción de este tipo de plantas en Siria, Turquía, Jordania, Brasil, Francia, Grecia... “He-

mos construido multitud de ciclos fuera de España.”

Previamente habían construido centrales térmicas de carbón en diversos países y ahora trabajan también en la construcción de grupos supercríticos duales de fuel pesado, en Arabia Saudí, en captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y, pensando en el futuro y en dentro de los programas marco de la UE, en proyectos destinados a demostrar la viabilidad de generar hidrógeno a altas temperaturas para determinar las posibilidades energéticas de este vector energético.

Toda esta experiencia en el mundo energético, en sus diversas facetas, les ha colocado en una excelente posición para su acercamiento a la energía de fusión, a través del ITER, un área en la que llevan “20 años trabajando”, asegura Domínguez. “Cuando se decidió la construcción, participamos en la sección de los emplazamientos y, cuando se eligió Cadarache, en Francia, el primer contrato que tuvimos fue para el diseño del edificio donde se van a construir



Recreación que muestra cómo quedará el ITER cuando termine de construirse.

los imanes, los *Poloidal Field Coils*, y después, en 2010, llegó el contrato de los edificios de ITER, en consorcio con la empresa británica Atkins y las empresas francesas Assystem y Egis.”

Desde 2010 hasta 2018, este consorcio tiene la responsabilidad del diseño de 36 edificios, y la supervisión de la

construcción junto a los sistemas auxiliares que forman parte de ellos. En uno de ellos, llamado Tokamak, se alojará el propio reactor del ITER (que no forma parte de ese contrato). “Se trata de un volumen aproximado, y hablando en términos generales, equivalente al de dos centrales nucleares y con requisitos

de seguridad nuclear, seguridad sísmica, etc.” dice María Teresa Domínguez, “así que la experiencia nuclear de Empresarios Agrupados en este sentido ha sido muy positiva para el proyecto, destacando nuestra cultura de seguridad, el conocimiento de las instalaciones nucleares y la aplicación de la normativa nuclear.”

Aunque es un lugar común asegurar que a la fusión siempre le quedan 50 años para empezar a funcionar, parece que esta tendencia se va a quedar atrásada pronto por la construcción del ITER. “Estamos más o menos a la mitad del proyecto de los edificios. El diseño está ya muy avanzado, y, de hecho, la autoridad reguladora nuclear francesa nos acaba de aprobar el diseño para el edificio del *tokamak*, el edificio central”, dice María Teresa Domínguez. “También están ya adjudicados los contratos de construcción de los edificios (en paquetes, los nucleares, los no nucleares...); también se ha adjudicado la parte eléctrica que forma parte de este



María Teresa Domínguez, directora de Proyectos Nucleares Avanzados de Empresarios Agrupados.

## Mirando más allá, mucho más allá

La participación en la construcción del Grantecan, el Gran Telescopio de Canarias, abrió las puertas a una especialización en la que han adquirido una experiencia que ahora están rentabilizando en todo el mundo. “Hicimos la estructura interna y la cúpula del Grantecan, y ahora tenemos un contrato para un telescopio que va a construir una red de universidades en EEUU” El Grantecan, además de estar situado en el privilegiado cielo canario, en concreto en el observatorio del

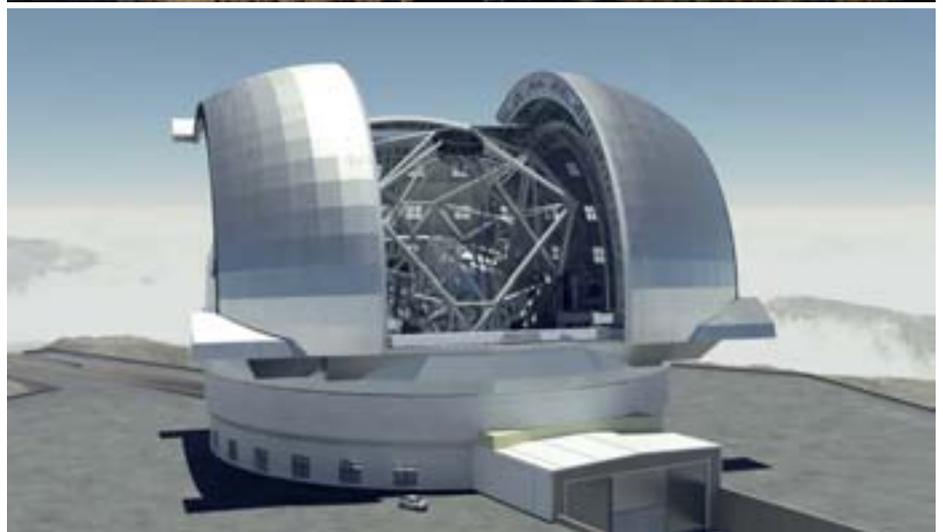
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en la isla de La Palma, es, con sus 10,4 metros de diámetro de espejo primario uno de los más grandes del mundo. Sus 36 espejos recibieron la primera luz en el año 2007 y desde 2009 su producción científica le ha colocado como la joya de la corona del observatorio astronómico más importante del hemisferio norte.

Esta experiencia les ha permitido ganar recientemente el concurso para construir un telescopio financiado por la red AURA, Association of Universities for Research in Astronomy, de universidades estadounidenses, lideradas por la Universi-

contrato, es decir, toda la distribución eléctrica, los sistemas auxiliares... “Quedan algunos contratos y paquetes nuevos que van apareciendo, pero ya está prácticamente todo adjudicado y los contratistas dispuestos para la construcción. Me consta que en algunas edificaciones se han comenzado ya las excavaciones, por ejemplo, las losas del *tokamak* están hormigonándose, lo que quiere decir que eso avanza y que el contrato refleja ya un 46 % de grado de ejecución. Es un contrato que nos está dando una proyección internacional muy importante. Es una instalación muy compleja. Se trata de uno de esos proyectos muy atractivos porque implican una gran participación internacional y tienen muchas ideas detrás.”

### Un salto al vacío

Además del contrato para la construcción de edificios, “en el ITER tenemos otro área importante de trabajo, sobre todo por los aspectos de seguridad, que es el diseño, fabricación y suministro del sistema de control de seguridad. Se llama sistema central de seguridad, SCS-N, y lo realizamos en consorcio con Inabensa. Además del diseño y la fabricación, incluye la cualificación para el producto, algo novedoso ya que, además de la parte ambiental y sísmica, como en las centrales nucleares, incluye también una parte muy importante



Arriba, el Gran Telescopio de Canarias. Abajo, el futuro telescopio europeo ELT, ubicado en Chile.

de compatibilidad electromagnética para las cargas del ITER.”

Además de sus actividades en el mundo de las energías, a mediados de los años ochenta Empresarios Agrupados dio un salto al vacío, en sentido estricto: comen-

zó a trabajar en proyectos espaciales y ha logrado una notable especialización en la construcción de grandes telescopios. “En el espacio trabajamos a través de Iberespacio, una empresa participada por Empresarios Agrupados. Empezamos aso-

dad de Arizona. Se trata del Large Synoptic Survey Telescope (Gran Telescopio para Rastros Sinópticos), que se instalará en Cerro Pachón, en Chile, un nuevo tipo de telescopio de gran apertura dotado de una cámara de 3.200 megapíxeles.

Y, también para Chile, Empresarios Agrupados tiene previsto participar en el concurso para la fabricación del European Extra Large Telescope, el E-ELT, para el que también pujó, como sede, el Instituto de Astrofísica de Canarias. En este monstruo, de 39 metros de diámetro en su espejo primario, Empresarios Agrupados se ocuparía, si la oferta prospera, del diseño de la

mecánica necesaria para mover, con precisión milimétrica, un gigante de 3.000 toneladas. Además, han trabajado en un telescopio de 30 metros para el observatorio de Hawaii. “Es un área —dice María Teresa Domínguez— en la que estamos teniendo mucho éxito gracias al trabajo en el Grantecan. Desde el punto de vista de la ingeniería, la construcción de estos telescopios es lo más, por las tolerancias que tiene, las condiciones ambientales, las dilataciones y la precisión que debe tener. Hacer una estructura interna de un telescopio es un proyecto muy complejo y muy bonito, es una maravilla”. Suerte. ▶

ciándonos con una empresa francesa, la Société Européenne de Propulsion, SEP.” Con la SEP llevaron a cabo el proyecto espacial, haciendo trabajos para simulación de la propulsión gracias a un programa muy elaborado y fiable de simulación en ordenador, EcosimPro, que ha sido adoptado por la ESA como su programa de trabajo en este campo. Se usa, entre otras aplicaciones, para analizar con antelación el funcionamiento de los motores Viking, que se utilizan en los lanzadores europeos Ariane 4 y 5, los cohetes de la ESA lanzados desde la Guyana. También ha sido adoptado por la NASA y por la agencia espacial canadiense.

En el ámbito de los satélites, Empresarios Agrupados ha desarrollado un sistema de transporte de calor basado en cambio de estado y que, en principio, está diseñado para la evacuación de calor de los satélites, es decir, para la refrigeración de los sistemas electrónicos de los satélites en vuelo. “En este campo”, señala Domínguez, “tenemos un hecho diferencial con respecto a las otras áreas de la empresa, en las que en general nos dedicamos a la ingeniería exclusivamente: aquí hemos creado una línea de fabricación de este producto, llamado Heat Pipes, que se está probando en satélites, porque es muy ligero, pero que puede tener otras muchas aplicaciones. Tenemos una fábrica en los alrededores de Madrid.” Estos sistemas de evacuación de ca-

lor pasivo se est n aplicando en ordenadores y también se piensa ya en aplicaciones nucleares, en submarinos y otras posibilidades.

También, en el ámbito de la defensa, han trabajado llevando a cabo desarrollos en el campo de las publicaciones técnicas para los aviones F-18 y, en aviación civil, para diversos modelos de la familia de los Airbus.

Una de las estrellas de sus trabajos recientes es la evolución de las herramientas de diseño. “Hemos creado una plataforma para generar la documentación de diseño de forma automatizada a partir de los modelos en 3D. Se trata de algo en

lo que ha sido muy reconocida la experiencia que tenemos. Esta plataforma la utilizamos con buenos resultados en todos los proyectos de nueva ejecución.” Poner en pie este sistema ha supuesto “un trabajo de cinco años y 13 personas para asegurar que la generación de la documentación de ingeniería con estas plataformas es fiable, controlada y con garantías de uso. Cada vez tendrá más importancia, y como lo hemos desarrollado en paralelo con los proyectos convencionales, de momento lo estamos usando solo en ellos, pero estamos en proceso de validación para que sea utilizado en proyectos nucleares en el futuro.” ©



Los programas de simulación permiten construir modelos virtuales en 3D.



De izquierda a derecha, reverso común de las medallas Nobel de Física y de Química, reverso de las de Medicina y anverso común a todas ellas.

Las distinciones otorgadas a los hallazgos sobre la radiactividad y sus aplicaciones marcan la historia del galardón

## Los Premios Nobel de la radiación

El número de Premios Nobel concedidos a descubrimientos relativos a la emisión, propagación y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas es elevado (solamente los rayos X y sus aplicaciones han merecido 28 distinciones). Desde que a principios del siglo XX, Roentgen, Becquerel y los esposos Curie subieron al podio en Estocolmo, los adelantos en materia de radiactividad han jalonado la trayectoria del galardón,

así como la historia de la ciencia y la tecnología contemporánea. A caballo de la física y la química, y con trascendentales repercusiones médicas, el avance en el conocimiento de las radiaciones es una de las claves del siglo XX y así lo confirma el palmarés sueco. Pero los expertos consideran que quizás la era dorada de las radiaciones haya quedado ya atrás.

■ Texto: **Pablo Francescutti** | periodista científico ■

Las radiaciones han acompañado a los Premios Nobel desde el arranque de estos galardones, los más reconocidos del mundo. El primero en recibirlo en la categoría de Física, en 1901, fue Wilhem Conrad Roentgen por su descubrimiento de los rayos X, y en su tercera edición fue concedido a los esposos Curie y a Henri Becquerel (Física, 1903) por el hallazgo de la radiactividad espontánea. A continuación vinieron las distinciones otorgadas a las radiaciones en el apartado de Química y, finalmente, en el de Medicina. Se inició así una andadura conjunta que confirma la cen-

tralidad de dicha área de estudio en la investigación más puntera del siglo XX.

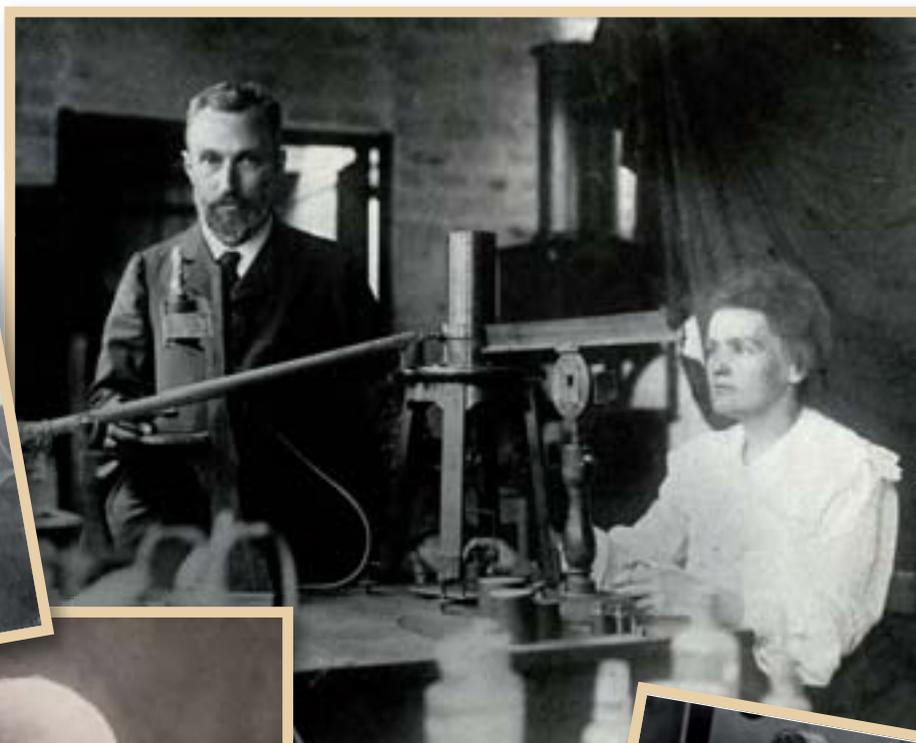
Considerada en toda su extensión, la ciencia de las radiaciones y sus diferentes subdisciplinas (física nuclear, medicina nuclear, física de partículas, astrofísica nuclear, física cuántica...) abarcan casi todo el palmarés en Física, por eso conviene restringir este repaso a los reconocimientos que tuvieron a las radiaciones y sus aplicaciones por protagonistas principales.

Comencemos por reseñar los honores concedidos a quienes empujaron las fronteras del conocimiento. La relación

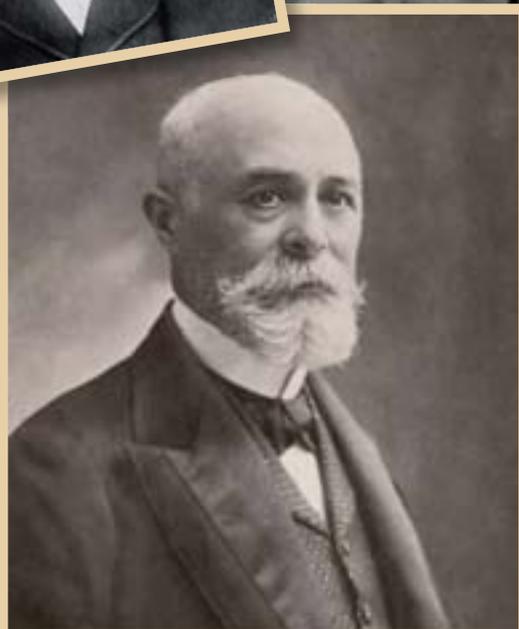
la encabeza Marie Curie (Química, 1911), galardonada por el descubrimiento del polonio y el radio, seguida del británico Charles Barkla (Física, 1917), por esclarecer los principios que rigen la transmisión de rayos X a través de la materia, y del americano A. H. Compton (Física, 1927), por confirmar la doble naturaleza ondulatoria y corpuscular de la onda electromagnética mediante el fenómeno actualmente conocido como “efecto Compton”. Albert Einstein (Física, 1921) había propuesto esta doble naturaleza de la radiación electromagnética para explicar el efecto fotoeléctrico.



Wilhem Conrad Roentgen, descubridor de los rayos X, fue el primer premiado con el Nobel de Física en 1901.



El matrimonio Curie y Henri Becquerel (izquierda) compartieron el Nobel de Física 1903.



A. H. Compton, Nobel de Física en 1927.

A los avances en rayos X se sumaron los registrados en otras franjas del espectro electromagnético. El anuncio de las leyes que gobiernan la radiación térmica —los “rayos caloríficos” de William Herschel— le supuso una distinción a Wilhem Wien (Física, 1911). Los rayos gamma tuvieron su momento de gloria en Estocolmo, en la persona de Rudolf Ludwig Mössbauer (Física, 1961), quien estudió su absorción por la materia. Otro tanto puede decirse de la radiación cósmica que impregna océanos, montañas y atmósfera: su origen externo al siste-

ma solar fue señalado por Victor Hess (Física, 1936); su naturaleza corpuscular, confirmada con el método de coincidencia de Walter Bothe (Física, 1945); en tanto Patrick Blackett (Física, 1948) perfeccionó su análisis mediante la cámara de nubes. Otro logro tuvo por objeto la radiación cósmica de fondo de microondas, el probable eco del Big Bang detectado con la antena gigante del Laboratorio Bell por Arno Penzia y Robert Wilson (Física, 1978). Y también el plano astrofísico, la prueba de la existencia de la radiación gravitacional aporta-

da por Russell Hulse y Joseph Taylor (Física, 1993).

### Radiaciones aplicadas

A los progresos teóricos les siguieron los reconocimientos a las soluciones técnicas dirigidas a aprovechar las radiaciones. Aquí los pioneros fueron Max von Laude (Física, 1914) y William Henry y William Lawrence Bragg (Física, 1915): el primero descubrió la difracción de los rayos X a través de los cristales; y los Bragg —padre e hijo, respectivamente— demostraron que con esta se podía visua-

## Los Oscar de la ciencia

Aparte de irrumpir en plena revolución de los fundamentos de la física y la química, los Premios Nobel entraron en escena en una coyuntura marcada por la globalización y la carrera armamentista entre las grandes potencias. En ese sentido, y al igual que las Olimpiadas, instituidas en esos mismos años, expresaban la necesidad de reconducir la rivalidad entre las naciones fuera del campo de batalla, de manera que hiciesen sus méritos en el estadio deportivo o en el laboratorio.

Vista en retrospectiva, la apuesta del inventor de la dinamita por un premio científico tuvo éxito, pues el suyo no solo fue el primero realmente internacional, sino que además su prestigio ha crecido al extremo de no tener parangón en el plano mundial. Su trayectoria no se ha visto libre de polémicas; los críticos le han achacado toda clase de sesgos, desde la sobrerrepresentación de suecos y alemanes entre los ganadores (debida en parte al estrecho vínculo entre ambas comunidades científicas) a su sexismo (muy marcado en el área que nos ocupa, donde, excepto Marie Curie, su hija Irene y Rosalyn Yalow, todos los galardonados han sido hombres). Se le acusa de ocultar la dimensión cooperativa de la ciencia bajo el culto romántico al genio individual y de tornar la búsqueda de conocimiento en una competición frívola al estilo de Hollywood, con su réplica de la ceremonia de los Oscar en la entrega de distinciones que tiene lugar cada 10 de diciembre en Estocolmo. En cualquier caso, lo cierto es que hasta los objetores más enconados admiten que si el Nobel no existiera, habría que inventar algo parecido, pues hoy



Rosalyn Yalow, Nobel de Medicina 1977.

más que nunca la sociedad del conocimiento precisa un indicador de excelencia lo más imparcial y prestigioso posible. ▶

lizar la disposición de los átomos en un elemento. Los tres sentaron las bases de la cristalografía de rayos X, un método capaz de dar información estructural acerca de una enorme variedad de proteínas, moléculas y macromoléculas sometidas a un proceso de cristalización. El perfeccionamiento de esa herramienta merecería varios Nobel, comenzando por

el otorgado a Petrus Debye (Química, 1936) por su descripción de las estructuras moleculares en gases y sólidos, y siguiendo por el entregado a Herbert Hauptman y Jerome Karle (Química, 1985) por la simplificación técnica derivada de sus métodos directos. Tras sucesivas mejoras, la difracción de rayos X sacó a la luz las estructuras de las proteínas

mioglobina y hemoglobina, resueltas por Max Perutz y John Kendrew (Química, 1962); la de los hidruros de boro, descrita por William Lipscomb (Química, 1976); y la de proteínas fundamentales en la fotosíntesis, determinadas por Johan Deisenhofer, Robert Huber y Harmut Michel (Química, 1988).

Sin la cristalografía de rayos X tampoco hubiera sido factible el desvelamiento de la estructura de la molécula del ADN, atisbada por Rosalyn Franklin, que murió antes de que se reconociera el hito, y resuelta finalmente por Francis Crick y James Watson (Medicina, 1962). Lo mismo puede decirse de las reglas elaboradas por Linus Pauling (Química, 1954) para interpretar los complejos datos producidos por la difracción de los rayos X, que le ayudaron a desentrañar el enlace químico.

No fueron las cristalográficas las únicas aplicaciones en derivarse de las radiaciones. Las sinergias entre los rayos X y la informática posibilitaron la tomografía computarizada, técnica radiográfica concebida por el sudafricano Allen M. Cormack y el británico Godfrey Hounsfield (Medicina, 1979). A su vez, los rayos X de alta energía, conocidos como radiación sincrotrón, permitieron a John Walker y Paul Boyer (Química, 1997) exponer el mecanismo enzimático de la síntesis de la adenosina trifosfato, y a Thomas A. Steitz y Venkatraman Ramakrishnan (Química, 2009) obtener imágenes a escala atómica de los entresijos del ribosoma, el complejo celular responsable de los miles de proteínas requeridos por el organismo.

Los radioisótopos, por su parte, mostraron un gran valor práctico. El germano George de Hevesy (Química, 1943) puso de manifiesto su utilidad como trazadores en el estudio de procesos químicos. Con ellos los americanos Rosalind Yalow y Solomon Berson (Medicina, 1977) diseñaron el radioinmunoensayo, que

revolucionó el análisis médico. Su compatriota Willard Libby (Química, 1960) hizo lo propio con las técnicas de datación geológicas al perfeccionar el método del carbono 14. Y Melvin Calvin (Química, 1961), de la misma nacionalidad, iluminó con radionucleidos las vías por las cuales las plantas usan la luz solar para convertir el dióxido de carbono en carbohidratos.

Un renglón aparte merece el caso de Herman Muller (Medicina, 1946). Este genetista, un firme convencido de la conveniencia de mejorar la línea germinal humana a base de irradiación, pasó a la historia por alertar del poder de las radiaciones para causar mutaciones en los seres vivos.

### Desde el núcleo atómico

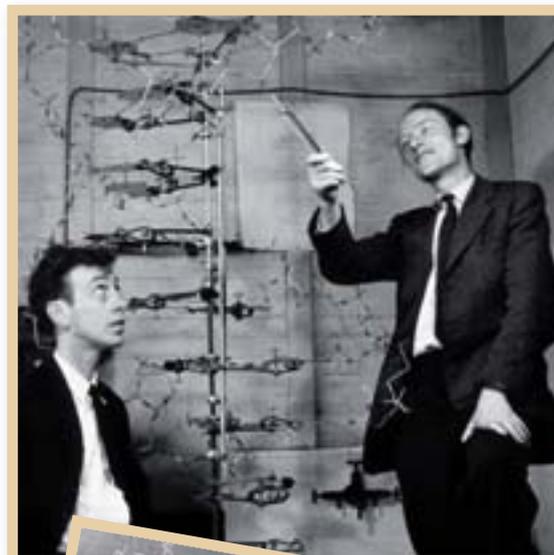
Sin negar un ápice de importancia a los hitos mencionados, el aspecto de las radiaciones más conocido por la opinión pública ha sido el concerniente a la liberación de la energía encerrada en el átomo. La carrera emprendida en los años treinta del siglo pasado por dilucidar la composición del núcleo atómico deparó un impresionante salto en ciencia básica con colosales repercusiones prácticas, logros que los comités suecos premiaron con una sucesión de galardones.

La señal de salida la dio el neozelandés Ernest Rutherford (Química, 1908) al explicar que los átomos poseen núcleos pequeños y compactos. Su discípulo inglés, Frederick Soddy (Química, 1921), aclaró el origen de los radioisótopos. Siguiendo su estela, Francis Aston (Química, 1922) identificó isótopos en elementos no radiactivos. Y el danés Niels Bohr (Física, 1922) propuso un modelo estableciendo las condiciones de emisión radiomagnética de los átomos.

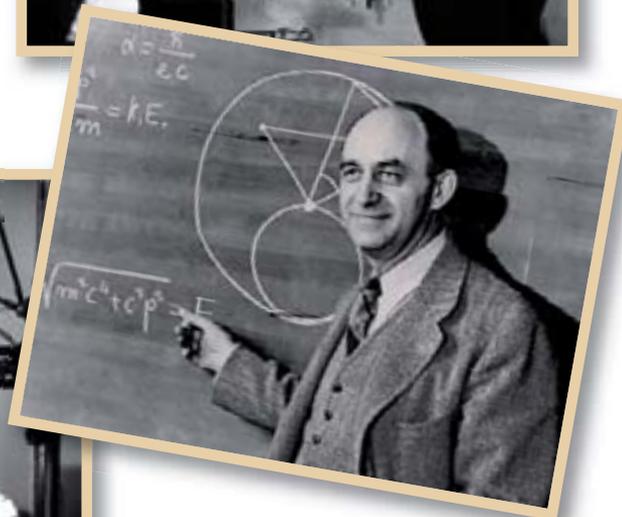
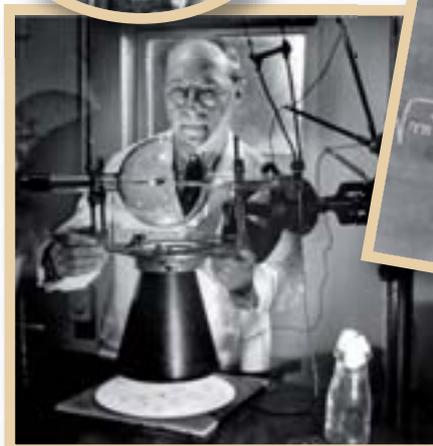
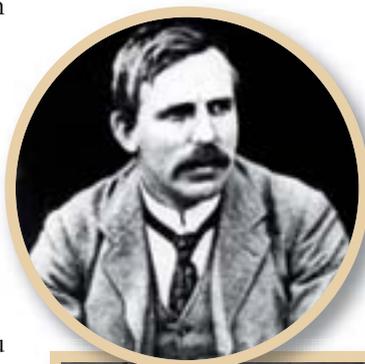
Las pesquisas se aceleraron en los años treinta: James Chadwick descubrió el neutrón (Física, 1935), lo que permitió a Enrico Fermi (Física, 1938) emplearlo para



Albert Michelson (Física, 1907), Albert Einstein (Física, 1921) y Robert Millikan (Física, 1923), durante la ceremonia de entrega de los premios en 1922



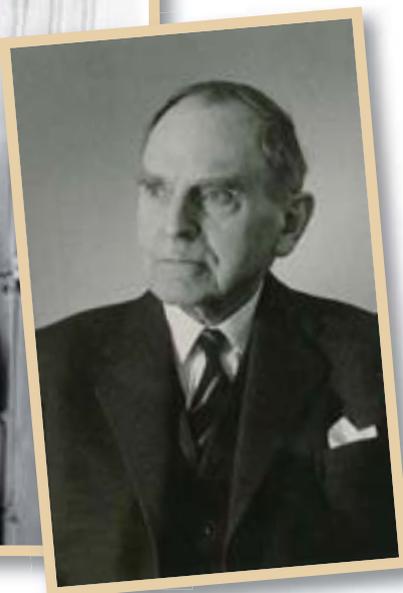
Francis Crick y James Watson (Medicina, 1962). Abajo, Ernest Rutherford (Química, 1908).



Arriba, Enrico Fermi (Física, 1938). A la izquierda Hermann Joseph Muller (Medicina, 1946).



Irene Curie y su marido Frédéric Joliot (Química, 1935).  
Abajo, Otto Hahn (Química, 1944).



bombardear uranio y crear nuevos elementos radiactivos. En Francia, Irene Curie y su marido Pierre Joliot (Química, 1935) cumplieron el sueño de los alquimistas con la transmutación atómica, abriendo una fuente de obtención rápida y barata de isótopos médicos. Poco después, el americano Carl D. Anderson descubrió el positrón y el muón (Física, 1936). El paso decisivo, sin duda, lo dieron Ernest Walton y John Concroft (Física, 1951), al partir átomos por primera vez con un acelerador de protones, allanando el camino a la descripción de la fisión nuclear por Otto Hahn (Química, 1944).

### Un lugar de privilegio en el podio

La cincuentena larga de laureados reseñados en esta relación, que no se pretende exhaustiva, confirma el lugar de privilegio de las radiaciones entre los temas de investigación más valorados por la Academia de Ciencias sueca. Que se repartan entre las categorías de Física y Química demuestra, por un lado, el carácter interdisciplinar de las radiaciones, y a la vez, como advierte el catedrático e historiador de la ciencia José Manuel Sán-

chez Ron, evidencia el interés de los químicos del país escandinavo por “hacer patente que la ciencia de la radiactividad también era de ellos, que formaba parte de la química, que no era patrimonio exclusivo de los físicos”. Por otra parte, que algunas menciones las concediera el Instituto Karolinska, encargado de otorgar los premios de Medicina y Fisiología, pone de relieve además el enorme impacto práctico que la domesticación de las radiaciones ha tenido en la salud humana.

Entrando en detalles, se observa que en el apartado de Física, los premios se centraron en física atómica, en detrimento de la física matemática, la geofísica y la astrofísica, énfasis que para unos es desmesurado y para otros totalmente justo si se considera a la física nuclear la “reina de las ciencias”. Controversias al margen, lo cierto es que aunque quizás el Nobel no refleje todos los logros de la ciencia de las radiaciones, esta no se entendería ni se documentaría sin su palmarés.

Nada de azaroso hubo en ello. La puesta en marcha del legado de Alfred Nobel corrió pareja a una oleada de observaciones, experimentos y conceptuali-

zaciones que conmocionaron las bases de la Física y la Química. La coincidencia histórica y el buen criterio de los comités seleccionadores quisieron que el nombre del galardón haya quedado asociado a las más sobresalientes contribuciones en ese periodo, con el resultado de que el progreso del saber sobre las radiaciones puede seguirse casi sin interrupción a través de sus tres modalidades científicas.

¿Seguirán las radiaciones ocupando un lugar tan destacado en las próximas ediciones del Nobel? A Sánchez Ron le resulta improbable “que se descubra algo nuevo en un terreno tan explorado como el de las radiaciones, salvo en sus aplicaciones. Más previsible parece que los Nobel vayan a trabajos en áreas más punteras como la física de altas energías o los nuevos materiales”, y concluye tajante: “La era dorada de las radiaciones ha quedado atrás”. En el mismo sentido se expresa Jean Pierre Adloff, profesor de la Universidad de Estrasburgo: “No creo que la investigación en radiactividad vaya a recibir un Nobel: las pesquisas en este tema pertenecen ya a la Historia”. El historiador Néstor Herrán, de la Universidad Pierre y Marie Curie de París, estima que ello dependerá de “la capacidad para atraer financiación y seguir produciendo innovación, la percepción social sobre el tema y dinámicas disciplinares complejas. La tendencia reciente en inversiones y el estancamiento del número de investigadores no parecen halagüeños, aunque la investigación a menudo depara sorpresas y nunca se sabe si en el futuro podría surgir algo nuevo”. ©

Los quarks, los constituyentes más elementales de la materia, cumplen 50 años

# Una hipótesis descabellada... pero cierta

“Los quarks son las partículas elementales que constituyen el núcleo atómico. Soy uno de los dos teóricos que predijo su existencia, y fui yo quien les puso el nombre” dice en su libro *El quark y el jaguar* Murray Gell-Mann, el Premio Nobel que en el mes de enero de 1964, hace medio siglo, propuso la existencia de estas partículas que hoy se consideran, junto a los leptones, los constituyentes más elementales de la materia conocida. Aquella hipótesis atre-

vida es hoy uno de los pilares del modelo estándar, la construcción físico-matemática que explica la estructura íntima de la materia a la escala más fundamental y que está exhaustivamente validada por numerosos experimentos, aunque quedan importantes cuestiones por resolver, como la naturaleza de la materia oscura y la integración de la fuerza gravitatoria en dicha teoría. ■ Texto: **Andrea Jiménez y Andrea Arnal** | periodistas científicas de Divulga ■

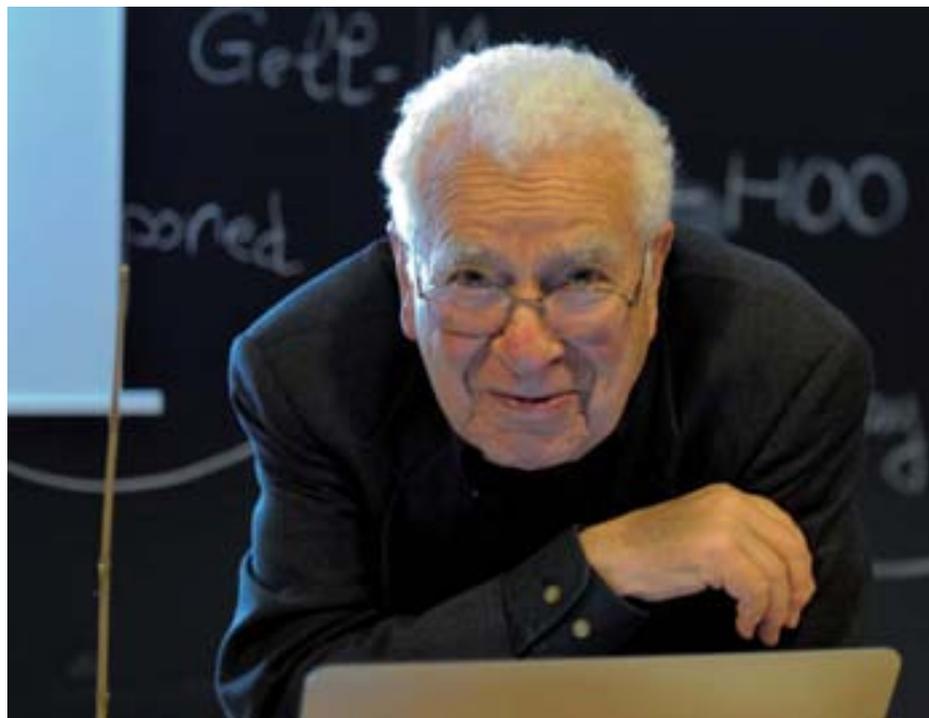
**H**asta lo que conocemos y lo que los experimentos han podido demostrar, toda la materia se compone de 12 tipos de partículas, que a grandes rasgos, y en función de características tales como el espín y la carga, se dividen en seis

leptones y seis quarks. “Los primeros son el electrón, el muón y el tau, partículas eléctricamente cargadas, y tres variedades de neutrinos, sin carga eléctrica, a los que durante mucho tiempo se les caracterizó por no tener masa, hasta que se demostró

que, a pesar de lo pequeña que era y la dificultad que implicaba medirla, la tenían”, explica Manuel Aguilar, físico madrileño que desde el año 1967, en el que llegó al Laboratorio Europeo de Física de Partículas Elementales (CERN), ha participado en muchas de las investigaciones de éxito que se han realizado en este ámbito.

Los quarks, por su parte, comprenden seis tipos distintos, cada uno de ellos con una historia apasionante basada en los obstinados intentos de los físicos para descubrirlos y reciben los imaginativos nombres de up (arriba), down (abajo), charm (encanto), strange (extraño), top (cima) y bottom (fondo).

Una de las singularidades que los caracteriza es que son las únicas partículas elementales que interactúan con las cuatro fuerzas fundamentales, es decir, con la interacción nuclear débil, la fuerte, la electromagnética y la gravitatoria. Esta última, que explica la atracción que se produce entre dos cuerpos con masa, no resulta congruente con el modelo estándar, el sistema que explica todas las demás partículas e interacciones, y uno de



Murray Gell-Mann, Premio Nobel de Física.

los retos de la física actual es conseguir integrarla en un modelo único.

Una característica de los quarks, que no tiene ninguna otra partícula, es que nunca se encuentran libres en la naturaleza, sino que siempre están unidos formando estructuras de dos o de tres quarks. En el primer caso, una pareja quark-antiquark da lugar a una de las partículas denominadas mesones. En el segundo caso, los tríos de quarks forman los bariones, grupo que incluye a los protones y neutrones que forman el núcleo atómico. “Esta se trata, sin duda, de la característica más revolucionaria de los quarks y por la que se dice que están confinados”, explica un investigador del Instituto de Física Teórica (Universidad Autónoma de Madrid/CSIC). “Es difícil entender que al dividir un elemento, este no se divide en las partes que en realidad lo constituyen, sino en otras diferentes”.

### Una propiedad muy peculiar

Esta peculiaridad se debe a la llamada libertad asintótica, una propiedad que se debe a que la fuerza que los mantiene unidos, la interacción fuerte, es más débil cuando los quarks están próximos y se incrementa a medida que se intentan alejar entre sí, como si estuviesen rodeados por una goma elástica. Y esta dificultad de romper la ligazón que los une retrasó la comprobación de la hipótesis de Gell-Mann y dilató el recorrido entre su postulación y la constatación de su existencia por evidencias experimentales. Otra rareza de los quarks es que la carga eléctrica que tienen es fraccionaria ( $2/3$  o  $-1/3$ ), no entera como ocurre con todas las demás partículas, incluidas las formadas por los propios quarks. Un protón, por ejemplo, que tiene carga positiva entera, está formado por dos quarks up ( $2/3$ ) y un down ( $-1/3$ ), de forma que  $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$ ; y un neutrón, que carece de carga, está formado por dos down y un up:  $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$ . Los anti-

		Quarks			Bosones		Bosón de Higgs
Quarks	Up	masa $2,3 \text{ MeV}/c^2$	carga $2/3$	espín $1/2$	Glúon	0	126 $\text{GeV}/c^2$
	Charm	$1,275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	Fotón	0	0
	Top	$173,07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	Bosón Z	0	0
	Down	$4,8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	Bosón W	1	1
	Strange	$95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$			
	Bottom	$4,18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$			
Leptones	Electrón	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$			
	Muón	$105,7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$			
	Tau	$1,777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$			
	Neutrino electrón	$<2,2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$			
	Neutrino muón	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$			
	Neutrino tau	$<15,5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$			
		1ª familia	2ª familia	3ª familia			

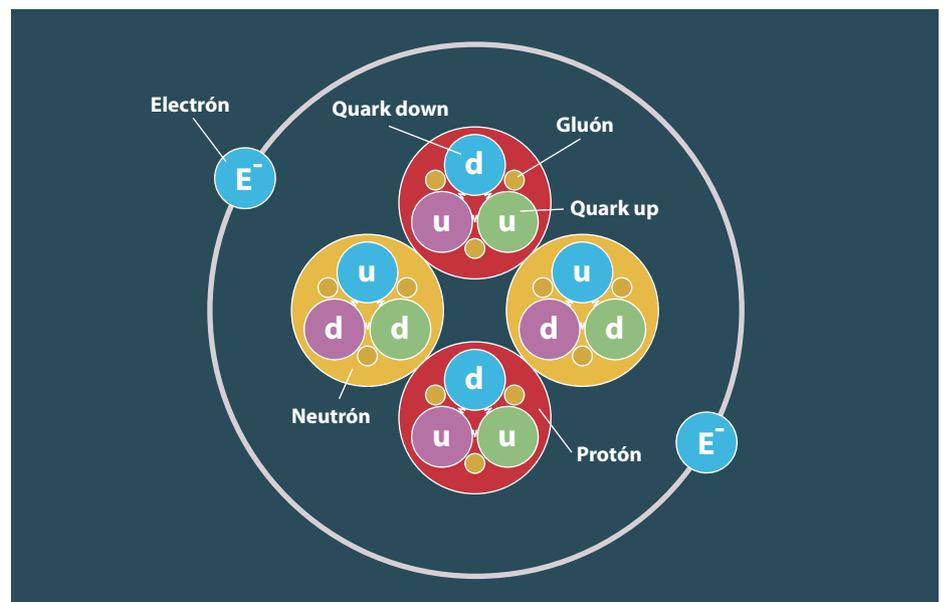
Modelo estándar de las partículas elementales.

quarks tienen la carga contraria, de forma que tienen  $1/3$  o  $-2/3$ .

La búsqueda de los componentes elementales de la materia parecía haber terminado a principios del siglo XX, cuando se hizo evidente la existencia de los átomos, considerados entonces indivisibles. Pronto, los experimentos de Ernest Rutherford demostraron que el átomo no era la última unidad fundamental en la composición de la materia, sino que constaba de un núcleo y una nube

electrónica que lo envolvía. Posteriormente se demostró la existencia de protones y neutrones, abriendo las puertas del zoológico de partículas elementales que todavía quedaba por descubrir.

“La verdadera búsqueda del cosmos subatómico llegó con el auge de experimentos que se estaban realizando en los años cincuenta en los aceleradores de partículas”, dice Juan Pérez Mercader, físico español que trabaja actualmente en la Universidad de Harvard. Con



Estructura de un átomo de helio-4.

## Nuevas partículas de cuatro y seis quarks

En los últimos años, diferentes experimentos han puesto de manifiesto la existencia de partículas formadas por más quarks que los bariones (de tres quarks) y los mesones (de dos). El pasado mes de abril, el CERN comunicaba la detección de más de 4.000 ejemplares de un tetraquark denominado Z(4430) en el Large Hadron Collider (LHC). Hasta don-

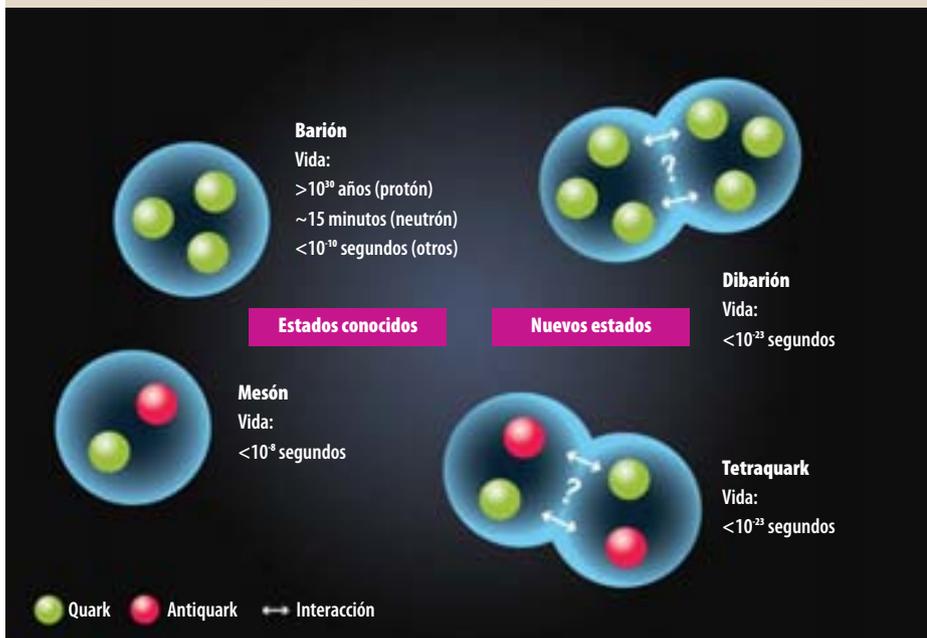
de los investigadores han podido medir, esta peculiar partícula es cuatro veces más pesada que un protón y parece estar formada por un quark charm (encanto), su antiquark, un antitopo y un quark down.

Otros tetraquarks, los denominados Zc(3900), Zc(4020) y X(3872), habían sido anunciados en los últimos dos años por otros laboratorios, como el KEK japonés, el BESIII chino y el Babar del Stanford Linear Accelerator Center estadounidense. Pero el número de eventos conseguidos en el LHC

supone la mayor evidencia conseguida hasta la fecha de su existencia. Previsiblemente, el número de tetraquarks detectados se incrementará rápidamente en el futuro próximo, dando lugar a todo un zoológico de nuevas partículas.

Se supone que los tetraquarks se forman por la unión de dos mesones. De forma similar, se buscan partículas nuevas resultantes de la unión de dos bariones, por lo que tendrían seis quarks. Y la pesquisa ya ha empezado a dar resultados. El pasado mayo, el Instituto de Física Nuclear Jülich, en Alemania, anunciaba la detección en su acelerador Cosy de algunas de estas partículas, denominada dibariones.

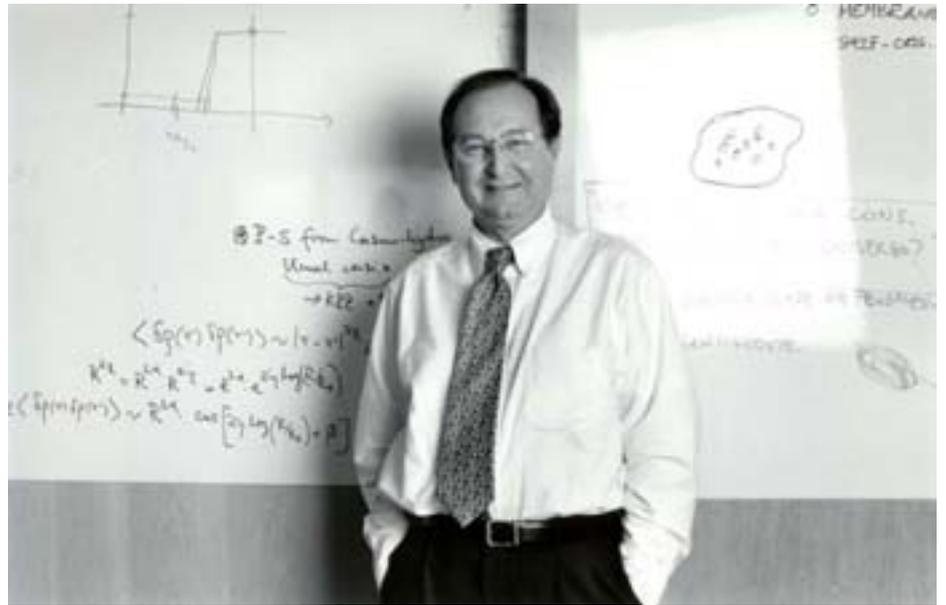
La posible existencia de partículas con más de tres quarks ya había sido predicha en los años sesenta, pero hasta hace poco no había podido ser detectada. En cualquier caso, la aparición de estas partículas, cuyo número previsiblemente se incrementa en el futuro, no alteran el modelo estándar, que sigue contando con los mismos seis tipos de quarks (más los seis antiquarks correspondientes). Y la nueva materia creada no tiene, de momento, ninguna posible aplicación práctica, ya que tetraquarks y dibariones se desintegran en fracciones minúsculas de tiempo: poco más de una cuatrillonésima de segundo.



Interior del túnel circular de 27 km donde se aloja el acelerador LHC del CERN, en Ginebra.

el desarrollo tecnológico de estos gigantes y costosos instrumentos, a energías muy elevadas y velocidades próximas a la de la luz, era posible llevar a colisionar frontalmente partículas con otras partículas y desplazarlas en dirección opuesta, resultando de este choque muchas otras nuevas. Estos experimentos permitieron indagar por primera vez en la estructura atómica a niveles que solo unos años antes hubieran sido impensables.

En los años cincuenta, a Gell-Mann le llamó la atención la diversidad de partículas que aparecían en los rayos cósmicos y en las colisiones en los aceleradores de partículas y pensó que quizás existiera alguna manera de clasificarlas, cuenta Pérez Mercader, amigo personal del premio nobel. Para empezar, observó que algunas de las partículas producidas se desintegraban mucho más lentamente de lo que les correspondería según lo que se sabía en ese momento. Para explicar este puzzle, introdujo una propiedad que llamó “extrañeza” y que, a través de la llamada fórmula de Gell-Mann y Nishijina, jugó unos años más tarde un papel central en el desarrollo del modelo de los quarks. “Usando esa fórmula y las matemáticas asociadas, observó que se podría dar cuenta de la diversidad de partículas si se postulaba



Juan Pérez Mercader, físico en la universidad de Harvard.

la existencia de objetos con cargas eléctricas que eran una fracción de la del protón y el electrón”, dice Pérez Mercader.

Por otro lado, gracias a sus conocimientos en teoría de grupos, una rama del álgebra actual, verificó que muchas de las partículas producto de las colisiones se podían clasificar en una estructura de matriz matemática que denominó  $SU(3)$ , constituida por agrupaciones diversas de tres partículas de carga fraccionaria, esas que más tarde denominaría con el término quarks.

“En 1961 Gell-Mann, que en aquel momento trabajaba en el Instituto de Tecnología de California (Caltech), publicó la proposición de un esquema al que llamó *The eightfold way* (la vía óctuple) —explica Pérez Mercader—, que organizaba los bariones y mesones en octetos, idea que otro físico israelí, Yuval Ne’eman, había llegado a proponer de forma independiente desde el Imperial College de Londres”.

En 1964, tras desarrollar más a fondo el esquema anterior y completarlo,



Acelerador lineal de Stanford. Vista aérea y detalle del detector.

## Cumpleaños feliz

El aniversario de la propuesta de existencia de los quarks por George Zweig y Murray Gell-Mann no ha pasado desapercibido. Los físicos de todo el mundo han organizado actos de celebración. En España, destaca el celebrado el 10 de junio en la sede de la Fundación Ramón Areces en Madrid, donde se celebró el simposio internacional “El quark cumple 50 años”, coordinado por Manuel Aguilar, investigador del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat).

Durante el evento, los ponentes presentaron una selección de las etapas cruciales que marcaron el desarrollo del modelo estándar. Álvaro de Rújula (Instituto de Física Teórica-CSIC, Madrid) habló de “Quarks: de hipótesis implausible a realidad sorprendente”; John Iliopoulos (École Normale Supérieure de París) de “La construcción del Modelo Estándar Electrodebil”; Luis Álvarez-Gaumé (CERN, Ginebra) de “El descubrimiento de la libertad asintótica y el nacimiento de la cromodinámica cuántica”; Tejinder Virdee (Imperial College, Londres) de “El triunfo del Modelo Estándar

y el descubrimiento del bosón de Higgs”; Giora Mikenberg (Weizmann Institute of Science, Israel) de “Los quarks como herramienta para interpretar la estructura de la materia”; y, finalmente, Sergio Bertolucci (CERN, Ginebra) de “El futuro de la física de partículas elementales”.

El simposio no solo realizó un recorrido histórico por los grandes hallazgos de los últimos 50 años en física de partículas, sino que también puso de manifiesto, en palabras de Aguilar, “los retos a los que se enfrentará esta disciplina en los próximos años para dar respuesta a todo aquello que aún no la tiene”.

También están presentes los quarks en el ciclo de conferencias “Los secretos de las partículas. La física fundamental en la vida cotidiana”, organizado conjuntamente por la Fundación BBVA y el CERN, con motivo del 60 aniversario de esta organización. El evento, que se está celebrando a lo largo de todo el año, tiene como objetivo dar a conocer los beneficios de la ciencia en la sociedad, presentar los retos presentes y futuros en el campo de la física de partículas y mostrar las tecnologías utilizadas en las grandes instalaciones científicas como el CERN. ▶

Murray Gell-Mann y, de forma independiente George Zweig en el CERN, concluirían que, para que tales patrones teóricos resultaran certeros, algunas de las



José Bernabéu, catedrático de Física en Valencia.

partículas debían estar formadas por otras más fundamentales. “Según esta nueva teoría, el protón y el neutrón dejaban de ser considerados partículas elementales para pasar a estar formados por tres unidades: los quarks, cuyo nombre se le ocurrió por un juego de palabras incluido en *Finnegans Wake*, un libro de James Joyce que por aquel entonces rondaba en la mesilla de noche de Gell-Mann, un apasionado de la literatura inglesa”, dice Pérez Mercader.

Hasta principios de los setenta no se validó su existencia, y los quarks dejaron de ser una especulación controvertida para convertirse, en palabras de José Bernabéu, catedrático de Física de la Universidad de Valencia, colaborador del CERN y Premio Jaume I 2008 de Investigación Básica, “en una de las sólidas patas del modelo estándar para dar explicación al comportamiento de la naturaleza en sus partes más íntimas”. Los experimentos realizados en el laboratorio del Centro del



Manuel Aguilar, investigador del Ciemat.

Acelerador Lineal de Standford (SLAC) entre 1967 y 1973, que consistían en lanzar electrones muy energéticos contra neutrones y protones, pusieron de manifiesto la existencia en el interior de los mismos de constituyentes cuyas propie-



Arriba, vista exterior acelerador Tevatrón, del Fermilab (Chicago), donde se descubrió el quark top, la partícula elemental más pesada. A la derecha, detección de un quark top.



dades coincidían con las propuestas para los quarks, que quedaban así respaldados experimentalmente. Los años setenta fueron prolíficos en el hallazgo de partículas a medida que se conseguían aceleradores capaces de generar mayores energías. El espaldarazo definitivo lo dio el descubrimiento del quark charm en dos laboratorios de Estados Unidos.

En 1974 dos grupos de investigación, uno del Laboratorio Nacional de SLAC, donde se pusieron de manifiesto los quarks up y down, y otro del Laboratorio Nacional de Brookhaven, dirigidos respectivamente por Burton Richer y Samuel Chao Chung Ting, detectarían el mesón  $J/\psi$ ,

formado por un quark charm y su anti-quark. Aquella revelación les llevó a conseguir el Premio Nobel de Física de 1976. A continuación, en 1977, se descubrió el quark bottom, en el Laboratorio Fermilab, cerca de Chicago. Completar la lista con el último tardaría mucho más, ya que hasta el 2 de marzo de 1995 no se anunció el hallazgo definitivo del sexto quark, el top. “Esta partícula es la más masiva de las conocidas hasta la fecha, y se desintegra tan rápidamente que no pueden formarse estados ligados top-antitop, como ocurre con los otros quarks. Fue descubierta en el acelerador Tevatrón del Laboratorio Fermilab, que has-

ta la entrada en funcionamiento del Gran Colisionador de Hadrones, el LHC del CERN, era el de mayor energía del mundo”, explica Aguilar.

El CERN, factoría por excelencia de un gran número de partículas elementales, ha conseguido producir de forma continua gran número de quarks top para estudiar a fondo esta partícula, la más pesada que se conoce. Según Bernabeu, “esto proporciona medidas extraordinariamente precisas de la masa del quark top, además de contribuir a uno de los grandes hitos de nuestro siglo con el descubrimiento del bosón propuesto por el mecanismo de Brout-Englert-Higgs para explicar el origen de la masa”. Y es que una parte importante de la investigación actual y futura de la física de partículas tiene como herramienta importante estudiar la interacción entre el top y el bosón de Higgs, la partícula de más masa y la que proporciona la masa.

Tras el siglo XX, que ha proporcionado espectaculares descubrimientos que han revolucionado la física, muchos consideran que el siglo XXI será el de la biología. Manuel Aguilar pone en cuestión esta idea: “Es difícil imaginar una disciplina del conocimiento científico con desafíos tan extraordinarios como la física y astrofísica de partículas y la cosmología. Entender la naturaleza de la materia y energía oscuras, que dan cuenta del 95 % del balance de materia-energía del Universo, entender cómo este ha evolucionado desde una situación simétrica en materia-antimateria en su fase primordial hasta un Universo aparentemente formado solo por materia, entender la naturaleza de los neutrinos, el origen de los rayos cósmicos con energías macroscópicas, etc., son tareas fascinantes que tratan de dar respuesta a cuestiones realmente fundamentales.” Como apunta Bernabeu, “¿qué sistema más complejo y esencial a su misma vez puede haber más apasionante que el que lo construye todo?” ©

# Panorama

## 58ª Conferencia General del OIEA

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) celebró su 58ª Conferencia General en Viena, entre los días 22 y 26 de



septiembre, con la participación de más de 3.000 representantes de los 159 Estados miembros, diversas organizaciones y medios de comunicación. La delegación española estaba encabezada por el embajador permanente de

España ante la Oficina de la ONU en Viena, Gonzalo de Salazar, y formaban parte de ella el presidente del Consejo de Seguridad Nuclear, Fernando Marti Scharfhausen, y los consejeros Fernando Castelló y Antoni Gurguí.

La declaración española, presentada por Gonzalo de Salazar, fue redactada conjuntamente por el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, el CSN y el Ciemat, y en ella se abordaron, entre otros asuntos, la colaboración del CSN en la revisión de las normas de seguridad del parque nuclear tras el accidente de Fukushima Daiichi, la participación que el organismo regulador español lleva a cabo en las misiones IRRS y en los programas de cooperación técnica dedicados a mejorar las infraestructuras reguladoras de Latinoamérica y del norte de África. ▸

## Informe favorable sobre la solicitud de renovación de la autorización de explotación de Trillo

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó un informe favorable a la solicitud de renovación de la autorización de explotación de la central nuclear de Trillo, incluyendo los límites y condiciones sobre seguridad nuclear y protección radiológica asociados, para un nuevo periodo de explotación de diez años, comprendido desde la expiración de la autorización actual hasta el 17 de noviembre de 2024.



La decisión adoptada se fundamenta en los resultados de la evaluación realizada por los servicios técnicos del organismo regulador, contenidos en un conjunto de 35 informes especializados que se acompañan de las condiciones específicas para esta instalación, así como 18 Instrucciones Técnicas Complementarias. ▸

## El CSN acoge la novena reunión del grupo de trabajo en emergencias de HERCA

El grupo de trabajo en emergencias del Comité de Dirección de la Asociación Europea de Autoridades de Control Radiológico (HERCA) se reunió en la sede del CSN durante los días 23 y 24 de septiembre. Participaron en el encuentro representantes de los organismos reguladores de 13 países europeos y dos expertos del OIEA, en calidad de observadores. Por parte del CSN, participaron la vicepresidenta, Rosario Velas-

co, y los directores técnicos de Protección Radiológica, M<sup>a</sup> Fernanda Sánchez, y de Seguridad Nuclear, Antonio Munuera.

Durante la reunión se analizaron las futuras vías de actuación en el entorno de HERCA y su coordinación con otras iniciativas europeas, como ATHLET, en relación con la gestión y respuesta en caso de emergencias. También se trató sobre la elaboración de fichas por países referidas a los aspectos técnicos más significativos y a las capacidades de cada país europeo para la preparación y respuesta en caso de emergencias en su fase temprana. ▸

## El CSN crea la Cátedra Vicente Serradell en la Universidad Politécnica de Valencia

El consejero del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Fernando Castelló, anunció, en su intervención durante la clausura de la 40ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española (SNE), que el CSN tiene previsto constituir una nueva cátedra con la Universidad Politécnica de Valencia, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

La nueva cátedra Universidad-Empresa del CSN se orientará a ampliar el conocimiento, producir desarrollos innovadores en el ámbito de la seguridad nuclear y la protección radiológica y llevará el nombre de Vicente Serradell, en honor al catedrático de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia que falleció en el año pasado. De esta forma, se mantiene el interés del organismo regulador español por incentivar la formación de técnicos altamente cualificados en las materias de su competencia. ▸

## Noveno aniversario de la creación de la Unidad Militar de Emergencias

La consejera del Consejo de Seguridad Nuclear, Cristina Narbona, participó el pasado 7 de octubre en el noveno aniversario de la Unidad Militar de Emergencias (UME), que ha coincidido con la festividad de Nuestra Señora del Rosario, patrona de esta unidad. El acto ha sido presidido por el jefe del Estado Mayor del Ejército de Tierra, Jaime Domínguez Buj, y contó con la presencia de la delegada del Gobierno en la Comunidad de Madrid, Cristina Cifuentes, entre otras autoridades. El aniversario tuvo lugar en la base aérea de Torrejón, donde se rindieron homenajes a la patrona de la UME y a la bandera. Posteriormente se produjo la imposición de condecoraciones a varios miembros de la UME y concluyó con un desfile de los diferentes destacamentos de la Unidad Militar de Emergencias y de sus vehículos motorizados. ▸



## Jornada sobre la mejora del proceso regulador como consecuencia del incidente de la central nuclear Vandellós I

El pasado 17 de octubre, el salón de actos del CSN acogió una sesión técnica sobre la mejora del proceso regulador como consecuencia del incidente de la central nuclear Vandellós I, ocurrido en 1989. Las lecciones aprendidas tras el incidente fueron la base para la modificación de varios procesos y procedimientos utilizados por el Consejo de Seguridad Nuclear. En esta sesión, se analizó internamente qué ocurrió, cómo lo vivieron las personas directamente involucradas y qué lecciones aprendidas se extrajeron de este incidente. ▸

El pasado 25 de septiembre el Consejo de Seguridad Nuclear fue galardonado en la primera edición de los Premios Duque de Ahumada a la Seguridad Corporativa, otorgados por la Guardia Civil, en la modalidad de “Mejor acción de difusión de la cultura de seguridad”. Recogió el galardón el presidente del CSN, Fernando Marti

## Premio Duque de Ahumada al CSN por la difusión de la cultura de seguridad



Scharfhausen, quien destacó la actividad del organismo como regulador en la protección de las instalaciones nucleares, a las que aporta una garantía de fiabilidad junto a todos los demás actores involucrados, desde los propios operadores hasta las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, dentro de la estrategia de la Seguridad Nacional. ▸

# Principales acuerdos del Pleno

## Directiva Euratom de seguridad en instalaciones nucleares

En su reunión del 28 de mayo, el Pleno del Consejo aprobó por unanimidad el Informe Nacional sobre implementación de la Directiva 2009/71/Euratom sobre la seguridad nuclear en las instalaciones. Se cumplen así, por parte del Estado, las obligaciones recogidas en dicha directiva. El informe se ha elaborado según las recomendaciones propuestas por la guía que desarrolló un subgrupo de trabajo de ENSREG.

## Modificación de la LEN en relación con terrenos contaminados

El Pleno del Consejo, en su reunión del 10 de junio, aprobó por unanimidad la modificación de la Ley de Energía Nuclear (LEN) en relación con terrenos contaminados radiológicamente, de acuerdo con la propuesta e informe de la Dirección Técnica de Protección Radiológica, que incluye el de la Subdirección de Asesoría Jurídica. Esta modificación introduce una regulación sobre las actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios para la declaración de suelos contaminados y de suelos con restricciones de uso por razones radiológicas.

## Informe para la Convención de Combustible y Residuos Radiactivos

El 10 de junio, el Pleno del CSN aprobó por unanimidad el quinto Informe Nacional para la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y de Residuos Radiactivos (borrador 0), elaborado por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, el CSN y Enresa. El informe será examinado en la reunión de revisión de las Partes Contratantes prevista en el artículo 30

de esta convención, que se celebrará en mayo de 2015.

## Informe de actividades del CSN del año 2013 al Parlamento

Tras estudiar y comentar sus contenidos, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó por unanimidad, el 10 de junio, el *Informe anual del CSN al Congreso y al Senado* (informe general y resumen), correspondientes a las actividades realizadas en el año 2013, en cumplimiento del artículo 11 de la Ley 15/1980. Los miembros del Pleno expresaron su agradecimiento a los participantes en el grupo de trabajo encargado de diseñar la nueva estructura del informe y a todos aquellos que contribuyeron a su redacción.

## Política de recursos humanos del CSN para el periodo 2014-2019

El Pleno del CSN analizó y aprobó por unanimidad, en su reunión del 16 de junio, un documento elaborado por la Subdirección de Personal y Administración, que establece las líneas directrices de la política de personal del CSN para el periodo 2014-2019, así como los instrumentos para alcanzar los objetivos propuestos. Pretende facilitar la difusión de las estrategias del Pleno en esta materia al Parlamento, a los trabajadores y a otros interesados.

## Supervisión de componentes transversales en el SISC

En su reunión del 25 de junio, el Pleno del Consejo aprobó por unanimidad la aplicación piloto, durante un año, de la supervisión de componentes transversales en el Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC). Los ajustes derivados de esta aplicación, tras el análisis de resultados, se-

rán sometidos a la decisión del Pleno antes de su definitiva integración. Con esta aplicación se incorporan al SISC aspectos organizativos y culturales que pudieran tener impacto en la seguridad nuclear.

## Impacto ambiental del ATC

En respuesta a la consulta realizada por la Dependencia de Industria y Energía de la Subdelegación del Gobierno en Cuenca, sobre el Estudio de Impacto Ambiental del Almacén Temporal Centralizado y Centro Tecnológico Asociado en Villar de Cañas (Cuenca), el Pleno del Consejo aprobó por unanimidad, el 16 de julio, el informe elaborado por la Dirección de Seguridad Nuclear, que considera aceptable dicho estudio en los aspectos de transporte, evaluación del impacto radiológico al público, vigilancia radiológica ambiental, análisis de alternativas, peligrosidad sísmica e idoneidad del emplazamiento.

## Posición del CSN en protección física de instalaciones nucleares

En su reunión del Pleno del 10 de septiembre, el presidente del Consejo, Fernando Martí Scharfhausen propuso al consejero Antoni Gurguí que expusiera las líneas generales del documento que recoge la postura del Pleno respecto al modelo más adecuado para la protección física de las instalaciones nucleares. Tras el oportuno debate, el Pleno del Consejo aprobó por unanimidad el documento "Análisis y posición del Pleno del CSN en materia de protección física de las instalaciones nucleares españolas", decidió dotarle del carácter de documentación confidencial, así como su remisión a las autoridades competentes en materia de protección física, para que surta los efectos oportunos. ©

# El CSN informa

Información relativa al segundo trimestre de 2014

## Centrales nucleares

### Almaraz I y II

Nº de sucesos (nivel INES)	1 en unidad I (INES 0) y 2 en unidad II (INES 0)
Paradas no programadas	1 (unidad II)
Nº inspecciones del CSN	9
Actividades	

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

Durante este periodo la operación de la central se ha mantenido a plena potencia sin incidentes, con la excepción de una parada no programada que se produjo el 23 de mayo, por actuación de las protecciones eléctricas del generador eléctrico principal, y se prolongó durante 11 días.

### Ascó I y Ascó II

Nº de sucesos (nivel INES)	7 en unidad I (INES 0) 1 en unidad II (INES 0)
Paradas no programadas	0
Nº inspecciones del CSN	12
Actividades	

La unidad I se mantuvo operando con normalidad, al 100 % de potencia, hasta el 14 de abril en que inició bajada para la vegisimotercera recarga de combustible, que se prolongó hasta el 27 de junio. El 29 de junio se pasó a modo 3 para efectuar una revisión en el sistema de aceite de cierres del alternador, y la unidad permaneció en estas condiciones hasta fin de mes.

La unidad II se mantuvo durante todo el periodo operando con normalidad al 100 % de potencia nuclear.

### Cofrentes

Nº de sucesos (nivel INES)	0
Paradas no programadas	0
Nº inspecciones del CSN	3
Actividades	

Durante el segundo trimestre de 2014, la central nuclear de Cofrentes se ha mantenido funcionando de manera estable en operación a potencia, con las siguientes excepciones. El 5 de abril se bajó al 83 % para cambio de secuencia de barras de control; el 26 de abril se bajó al 76 % a petición del Despacho General de Generación y el día 26 de junio se bajó al 63,6 % para el cambio de secuencia de las barras de control y para la realización de pruebas de distribución de flujo neutrónico.

El Pleno del CSN ha aprobado la Instrucción Técnica Complementaria de adaptación de las ITC Post-Fukushima.

### Santa María de Garoña

Nº de sucesos (nivel INES)	1 (INES 0)
Paradas no programadas	0
Nº inspecciones del CSN	8
Actividades	

En este periodo de tiempo la central ha operado sin incendios relevantes a plena potencia. El 19 de mayo se produjo un suceso notificable por un trabajador que presentaba un síndrome coronario agudo fue trasladado al hospital de Guadalajara, donde recibió el alta el 23 de mayo.

### Trillo

Nº de sucesos (nivel INES)	0
Paradas no programadas	0
Nº inspecciones del CSN	6
Actividades	

En este trimestre la central ha operado a plena potencia sin incendios relevantes.

### Vandellós II

Nº de sucesos (nivel INES)	1 (INES 0)
Paradas no programadas	0
Nº inspecciones del CSN	8
Actividades	

Durante este periodo la central ha funcionado al 100 % de potencia de forma estable, con alguna incidencia no significativa por indisponibilidad de equipos, que requirió durante varias horas en dos ocasiones una ligera reducción de potencia para intervenciones de mantenimiento.

## Instalaciones del ciclo y en desmantelamiento

### Ciemat

#### PIMIC-Rehabilitación

En este periodo se continuó la preparación de la documentación del Plan de Control de Materiales Desclasificables y de la documentación para la clausura de la IN-04 Laboratorio de Celdas Metalúrgicas, y prosiguieron las actividades de rehabilitación del edificio 20, nave 30.

#### PIMIC-Desmantelamiento

Durante este trimestre se gestionaron expediciones de residuos al centro de almacenamiento de El Cabril y se continuó la preparación del segundo plan de pruebas para la desclasificación de las tierras procedentes del Montecillo. Además, se realizó la caracterización final de las zonas excavadas en los alrededores de la Lenteja, se procedió a su relleno y se acondicionó la carpa para su uso como depósito temporal de residuos de muy baja actividad.

<b>Nº de sucesos</b>	<b>1</b>
<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>1</b>

## Centro de Saelices el Chico

### Planta Quercus

En el mes de junio se aceptó el programa de protección contra incendios, cuya implantación se realizará tras la aprobación de los documentos oficiales de la planta, cuyas revisiones están en evaluación.

<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>1</b>
--------------------------------	----------

### Minas de Saelices

Las instalaciones siguen bajo control, sin observarse incidencias significativas.

## Otras instalaciones de minería de uranio (Salamanca)

### Planta de concentrados de Retortillo

Berkeley Minera España, SA presentó documentación adicional relacionada con la autorización previa de la planta de concentrados de uranio de Retortillo. En junio, el CSN consideró que la documentación presentada da cumplimiento a lo establecido en los anexos a la orden del Ministerio de Industria de 8 de noviembre 2013, referente a la solicitud de autorización previa de la planta.

### Mina de Retortillo-Santidad

El 25 de abril se recibió en el CSN copia de la resolución de la Dirección General de Energía y Minas de la Junta de Castilla y León, acordando conceder a la entidad Berkeley Minera España (BME) la concesión derivada de explotación denominada Retortillo-Santidad, nº 6.605-10, para recursos de la Sección D), minerales de uranio, de 87 cuadrículas mineras, en los términos municipales de Retortillo y Villavieja de Yeltes (Salamanca).

<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>0</b>
--------------------------------	----------

## Fábrica de uranio de Andújar

### Actividades

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

<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>2</b>
--------------------------------	----------

## El Cabril

### Actividades

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

baja actividad. El Ministerio de Industria ha autorizado una modificación de diseño de la instalación que permite el almacenamiento definitivo de fuentes radiactivas de radionucleidos con periodo de semidesintegración entre el cobalto-60 y el cesio-137.

<b>Nº de sucesos (nivel INES)</b>	<b>0</b>
<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>5</b>

## Vandellós I

### Actividades

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

<b>Nº de sucesos</b>	<b>0</b>
<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>1</b>

## José Cabrera

### Actividades

Durante el periodo prosiguieron las actividades previas de segmentación de la vasija del reactor, que culminaron con el traslado de dicha vasija desde la cavidad del reactor al foso del combustible gastado y el posicionado en su soporte para iniciar la segmentación. Asimismo, prosiguieron las actividades de desmontaje de otros componentes del circuito primario, como las de segmentación del generador de vapor.

<b>Nº de sucesos</b>	<b>1</b>
<b>Nº inspecciones del CSN</b>	<b>6</b>

## Juzbado

### Actividades

Durante este trimestre la instalación ha desarrollado sus actividades sin incidencias destacables en su operación.

El CSN informó favorablemente las siguientes solicitudes:

—Modificación de las ETF y del Estudio de Seguridad por la redistribución de cargas entre los dos grupos electrógenos de la instalación.

—Modificación del capítulo 7 del Estudio de Seguridad.

—Revisión 10 del Plan de Protección Física.

—Modificación del Estudio de Seguridad por cambio en el tiempo de arranque requerido para los grupos electrógenos de la instalación.

<b>Nº sucesos</b>	<b>0</b>
<b>Nº de inspecciones del CSN</b>	<b>5</b>

## Instalaciones radiactivas

Resoluciones adoptadas sobre instalaciones radiactivas (científicas, médicas, agrícolas, comerciales e industriales):

Informes para autorización de nuevas instalaciones	8
Informes para autorización de modificación de instalaciones	71
Informes para declaración de clausura	14
Informes para autorización de servicios de protección radiológica	0
Informes para autorización de unidades técnicas de protección radiológica	2
Informes para autorización de servicios de dosimetría personal	0
Informes para autorización de retirada de material radiactivo no autorizado	7
Informes para autorizaciones de empresas de venta y asistencia técnica de equipos de rayos X para radiodiagnóstico médico	2
Informes para autorización de otras actividades reguladas	7
Informes relativos a la aprobación de tipo de aparatos radiactivos	3
Informes relativos a homologación de cursos para la obtención de licencias o acreditaciones	17

Acciones coercitivas adoptadas sobre instalaciones radiactivas (científicas, médicas, agrícolas, comerciales e industriales):

Apercibimientos a instalaciones radiactivas industriales	7
Apercibimientos a instalaciones radiactivas de investigación o docencia	0
Apercibimientos a instalaciones radiactivas médicas	1
Apercibimientos a unidades técnicas de protección radiológica	0
Apercibimientos a servicios de protección radiológica	0
Apercibimientos a instalaciones de rayos X médicos	6
Apercibimientos a otras actividades reguladas	1

## Seguridad física

### Actividades más relevantes

Durante este periodo se evaluaron los planes de protección física de las instalaciones nucleares para su adaptación a la Guía de Seguridad 8.2 del CSN.

Se finalizó la redacción y distribución para comentarios internos del Borrador 0 de la Instrucción de Seguridad para la protección física de fuentes radiactivas.

Continuaron los trabajos para el establecimiento de una red segura para la protección de información clasificada.

Además, se colaboró con el Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas para la aprobación del Plan Estratégico del Sector Nuclear.

### Cursos

Se colaboró con la AEAT en la formación de actantes de primera línea en el sistema de control radiológico de fronteras en los puertos de Tarragona y Valencia.

Se impartió el curso Actuación en Caso de Incidente con Fuentes Radiactivas, a las patrullas del Cuerpo Nacional de Policía.

Se participó en la formación de los técnicos en desactivación de explosivos del Cuerpo Nacional de Policía y en el Máster de Inge-

nería Nuclear y Aplicaciones, organizado por la Universidad Autónoma de Madrid y el Ciemat.

Simulacros	0
Nº de Inspecciones	3 (Ascó, Garoña y Vandellós II)

### Actividades internacionales

Se celebró en el CSN la 5ª Reunión Bilateral USNRC-CSN sobre protección física de centrales nucleares. Se participó en la V Reunión del Comité de Orientaciones sobre Seguridad Física del OIEA. Se asistió al Seminario sobre Protección Física en Radiografía Industrial y Prospección Minera, organizado por el World Institute of Nuclear Security.

## Notificación de sucesos

Nº incidentes en instalaciones nucleares notificables en 1 hora	2
Nº incidentes en instalaciones nucleares notificables en 24 horas	15
Nº incidentes radiológicos	7
Hechos relevantes	Ninguno reseñable

## Emergencias

### Activación de la ORE

El 5 de mayo, el Ciemat declaró prealerta de emergencia al producirse el vaciado de la piscina de almacenamiento de fuentes encapsuladas de patrones neutrónicos, como consecuencia de un fallo en el sistema de recirculación y aporte de agua. Se perdió el blindaje primario de las fuentes. El suceso no supuso ningún riesgo radiológico ni para el personal ni el medio ambiente.

### Otras actividades relevantes

En este periodo se realizaron ejercicios de activación de Estaciones de Clasificación y Descontaminación del Penbu, Pengua y Penva y de control de accesos en el Penbu y el Pengua. También se realizaron simulacros para comprobar la operatividad de los planes de emergencia interior en El Cabril y en las centrales nucleares de Trillo, Vandellós II y Almaraz.

Antes de declarar la completa operatividad del Centro de Apoyo en Emergencias, se realizaron en todas las centrales nucleares pruebas de campo de los equipos y componentes previstos para afrontar grandes emergencias.

Se colaboró con la Escuela Militar de Defensa en la impartición del curso sobre riesgos NBQ y se organizó e impartió el Curso de Supervisores de Equipos de Intervención en Emergencias Radiológicas y Nucleares, para miembros de la Unidad Militar de Emergencias.

### Eventos internacionales

El CSN participó en el grupo AtHLET y colaboró en la preparación de la reunión de HERCA, uno de cuyos grupos es el Working Group Emergency (WGE).

# www.csn.es



## El ciclo de combustible nuclear

Desde las minas de las que se extrae el uranio hasta el almacenamiento de los residuos radiactivos generados, el combustible que alimenta las centrales nucleares realiza un largo recorrido minuciosamente planificado para evitar que produzca daños en las personas y en el medio ambiente. Una secuencia de infografías permite conocer todo este proceso en el Canal Saber de la web del Consejo:

<http://www.csn.es/index.php/es/infografias/13451-el-ciclo-del-combustible-nuclear->



## Informe anual del CSN al Parlamento

El Consejo de Seguridad Nuclear debe remitir un informe pormenorizado de la actividad realizada durante cada ejercicio al Congreso de los Diputados y al Senado. Dicho informe es presentado posteriormente por el presidente del CSN ante una ponencia específica de la Comisión de Industria. El contenido de dichos informes, incluido ya el del ejercicio 2013, está disponible en la web:

<http://www.csn.es/index.php/es/relaciones-cortes/-informe-anual>



## 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



**Informe Nacional sobre la aplicación de la Directiva 2009/71/Euratom**  
Mayo 2014



**Real Decreto 102/2014, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos**

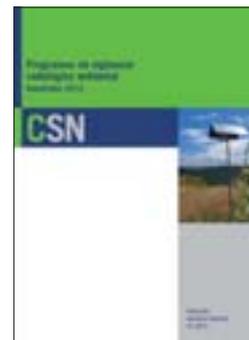


**Estudio de la problemática existente en la determinación del índice de actividad alfa total en aguas potables**



**Procedimientos para la determinación del índice de actividad alfa total en aguas potables mediante:**

- Método de desecación
- Método de coprecipitación
- Método de centelleo líquido



**Programas de vigilancia radiológica ambiental**  
Resultados 2012

**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

### 18 **The life of torment of the Sun**

Solar activity increases and decreases over a cycle lasting 11 years. At its moments of greatest convulsion, the Sun belches forth a gigantic flow of ionised particles that cause the aurora borealis, alter the climate and interfere with telecommunications. They may even affect man-made satellites and electrical systems.

### 40 **The machine that will imitate the Sun emerges from Earth**

The ITER international nuclear fusion experimental reactor, located at Cadarache (France), is seeing its construction process gain in pace, after years of delays, in an attempt to have the reactor initiate its operation in 2022 and demonstrate that nuclear fusion may constitute a clean and inexhaustible source of energy. The foreseen cost of the facility currently stands at 15,000 million Euros.

### 48 **From the core of the atom to the Universe**

Set up during the period in which Spain's nuclear power plants were being built, over time the engineering firm Empresarios Agrupados widened its horizons to cover new markets, moving from fission to fusion and even finding a niche in other areas such as telescopes and the space industry.

### 54 **The radiation-related Nobel Prizes**

Phenomena relating to radiation and radioactivity have been outstanding protagonists in the history of the Nobel Prize, which is the same as saying in the history of science in the 20th and 21st centuries. X-rays and their applications have alone merited 28 awards. However, the experts consider that the golden age of major discoveries in this area is now a thing of the past.

### 59 **A crazy hypothesis ... but true**

In 1964, Murray Gell-Mann proposed the existence of certain elementary particles, that he called quarks, which, along with leptons explain known matter and are today - 50 years later - an essential building block of the standard model, the physical-mathematical construction that explains the intimate structure of material, exhaustively validated through numerous experiments.

## INSIDE THE CSN

### 4 **Resident inspectors, the regulatory task from the inside**

An essential element of the complex web that is the supervision of nuclear power plants is the work performed in situ by the resident inspectors, 113 members of the technical staff who are "the eyes and ears of the CSN on the spot".

### 38 **RADIOGRAPHY**

Blocking of the thyroid with stable iodine.

## INTERVIEW

### 32 **Juan Fuster Verdú, co-chairman of ICHEP 2014**

"We have not yet seen the true face of the Higgs boson".

## TECHNICAL ARTICLES

### 12 **Radiological protection services: How to dimension their human and material resources**

The Forum on Radiological Protection in Health Care has set up a working group to draw up a technical document including recommendations aimed at helping to plan and assess the resources of radiological protection services.

### 24 **Denting in steam generators**

In the 1990's, the steam generators installed at the Ascó and Almaraz plants suffered a type of degradation known as denting, associated probably with the accumulation of sludges and impurities in the secondary system. As a result, they are applying strategies aimed at maintaining an adequate level of plant safety.



# 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.