

CSN

# ALFA



Revista de seguridad  
nuclear y protección  
radiológica

Consejo de  
Seguridad Nuclear

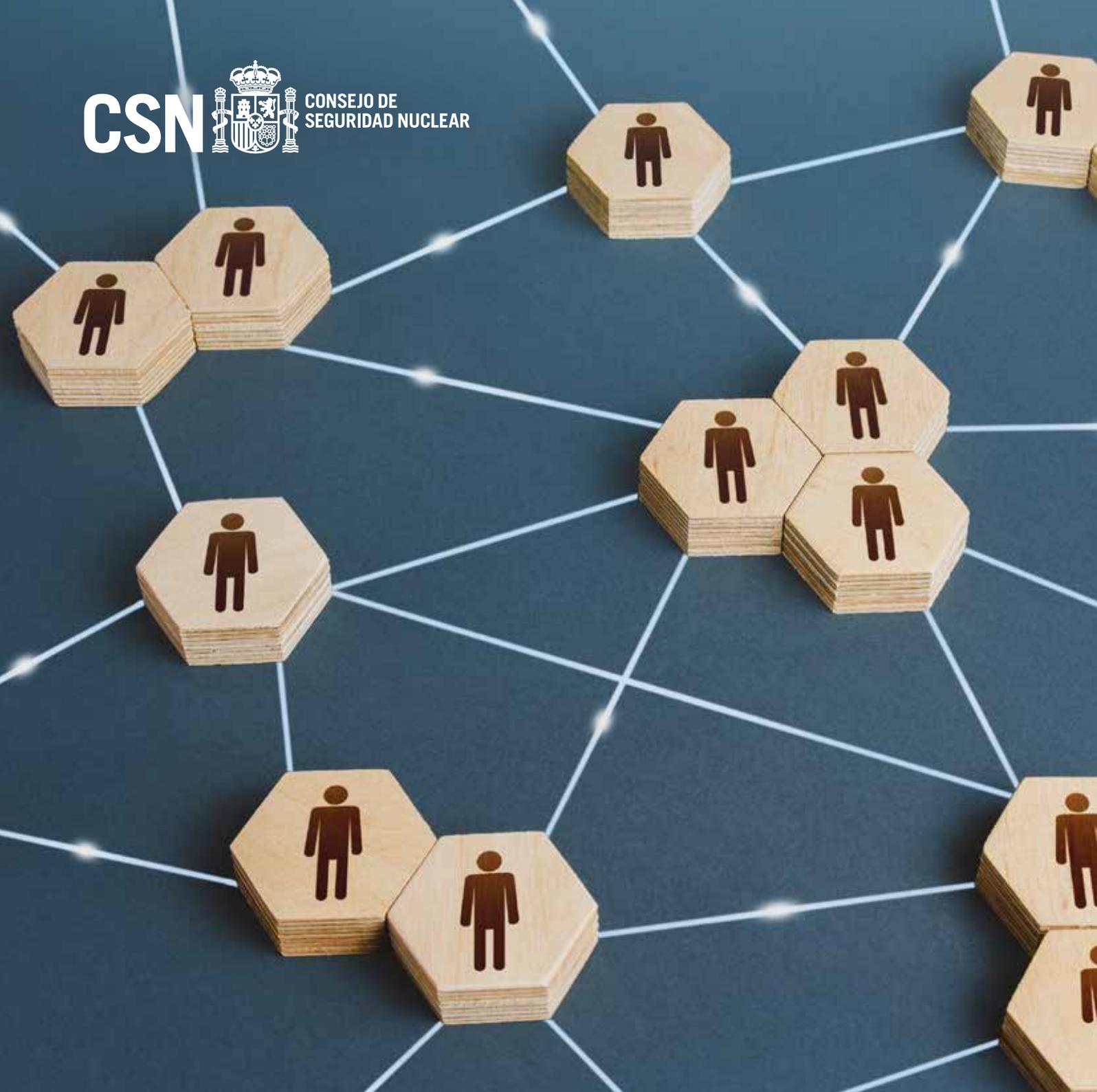
Número 60  
Diciembre 2024

## La clave está en los neutrones

Guardianes de la seguridad:  
la Inspección Residente  
celebra el 40 aniversario  
de su creación

Reactor Experimental  
Termonuclear  
Internacional: camino  
hacia la energía de fusión

Instituto de Fusión Nuclear  
Guillermo Velarde: referente  
europeo en la fusión por  
confinamiento inercial



# ¡Conecta con nosotros!



[https://twitter.com/CSN\\_es](https://twitter.com/CSN_es)



[https://www.youtube.com/c/  
ConsejoSeguridadNuclear](https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear)



[https://www.linkedin.com/company/  
consejo-de-seguridad-nuclear/](https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/)



<http://www.csn.es>

**TRANSPARENCIA > COMUNICACIÓN > DIVULGACIÓN**

**E**l descubrimiento del neutrón por el físico y Premio Nobel británico James Chadwick en 1932 representó un hito fundamental en la física moderna y en la comprensión de la estructura del átomo. Desde entonces, la investigación sobre neutrones es un reto fascinante. En España se estudian en la instalación HiSPANoS del Centro Nacional de Aceleradores y, en Europa, en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares con el proyecto n\_TOF, a los que este número de *Alfa* dedica el tema de portada.

El Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), ambicioso proyecto desarrollado en Cadarache, al sur de Francia, con la colaboración de treinta y tres países, acapara también la atención de estas páginas, que repasan los avances notables en materia de tecnología de fusión, tanto en iniciativas de I+D privadas como públicas. Los obstáculos que impiden la comercialización de la fusión reclaman más investigación en materiales y más ingeniería de precisión. Los desafíos tecnológicos, de financiación y de recursos humanos obligan a admitir que el ITER necesita, sobre todo, tiempo.

La Inspección Residente del CSN cumple cuatro décadas de funcionamiento en España con la misión principal de supervisar de forma continua y directa las operaciones de las centrales. El programa, creado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en 1984, ha jugado un papel decisivo en la mejora continua de la seguridad en las

instalaciones nucleares españolas y *Alfa* le dedica en esta ocasión un merecido tributo.

Cuarenta años cumple también la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), consolidada como referente en la gestión de materiales radiactivos. Su presidente, José Luis Navarro, subraya como logros más destacados, en la entrevista central, las labores de desmantelamiento de Santa María de Garoña y la ejemplar eficiencia del Centro de Almacenamiento de El Cabril. Todo enmarcado en el séptimo Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), aprobado hace un año como pieza clave para garantizar el cierre ordenado de las cinco centrales nucleares operativas en el país.

La participación activa del CSN y la Universidad Politécnica de Madrid en el Proyecto GO-MERES, sobre simulación con Gothic del comportamiento en contención del hidrógeno con rociadores y piscinas de supresión, abre el bloque técnico, que se cierra con el trabajo de José Luis Revilla sobre la experiencia reguladora en el desmantelamiento de instalaciones nucleares.

La ciencia cede espacio una vez más a las artes y, en esta ocasión, se fusiona con la música. Dos disciplinas que, a lo largo de la historia, han formado un dúo inseparable para fomentar la comprensión del universo y sus leyes. Así, se profundiza en la idea de que la música no solo ha sido un arte placentero, sino también un precioso medio para contemplar la llamada perfección

divina, donde números y proporciones sirven de puente hacia una mayor trascendencia.

En la sección de «Radiografía», José María Rey Gayo aborda las diferencias más importantes entre los elementos combustibles de las centrales PWR (con reactores de agua a presión) y BWR (con reactores de agua en ebullición), que componen el parque nuclear en España.

A continuación, Juan Pedro Bolívar Raya repasa uno de los proyectos financiados por el CSN sobre la «Exhalación de radón en materiales de construcción: impacto radiológico y medidas correctoras (EXradón)», profundizando en su alcance y objetivos.

En el capítulo de entidades destacadas, este número de *Alfa* se aproxima al Instituto de Fusión Nuclear Guillermo Valverde, referente europeo en la fusión por confinamiento inercial, cuya misión principal es generar conocimiento científico y aportar soluciones tecnológicas en beneficio de la sociedad.

Y finalmente, los nombres propios de la ciencia a través de la historia se detienen en estas páginas en la figura de Werner Heisenberg, autor del principio de indeterminación y de algunas de las bases matemáticas que darían lugar a la mecánica cuántica. Uno de los mejores físicos teóricos del siglo XX enriquece el contenido de este ejemplar, que esperamos sirva de inspiración y deleite. ■

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica  
Editada por el CSN

Número 60  
Diciembre 2024



#### Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo  
Pilar Lucio Carrasco  
Francisco Castejón Magaña  
Elvira Romera Gutiérrez  
Teresa Vázquez Mateos  
Javier Zarzuela Jiménez  
Ignacio Martín Granados  
J. Pedro Marfil Medina  
Manuel Lozano Leyva

#### Comité de Redacción

J. Pedro Marfil Medina  
Natalia Muñoz Martínez  
Vanessa Lorenzo López

Adriana Scialdone García  
Arturo Fernández García  
Verónica Crespo Val  
Manuel Luis Lozano Leyva  
Ana Martínez Fernández

#### Edición y distribución

Consejo de Seguridad Nuclear  
C/ Pedro Justo Dorado  
Dellmans, 11 · 28040 Madrid  
Tel. 91 346 01 00  
peticiones@csn.es  
www.csn.es

#### Coordinación editorial

Editorial MIC · 987272727  
www.editorialmic.com

#### Fotografías

CSN, Editorial MIC, OIEA, LSC,  
Fundación Starlight, Envato.

#### Impresión

Editorial MIC  
Proyecto de computadora  
cuántica universal / Google

D.L.: 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.



## EN PORTADA

### 6 **La clave está en los neutrones**

El descubrimiento del neutrón por el Premio Nobel británico James Chadwick en 1932 representó un hito fundamental en la física moderna y en la comprensión de la estructura del átomo. Desde entonces, la investigación sobre neutrones es un reto fascinante



## REPORTAJES

### 14 **Continúa el camino hacia la energía de fusión**

Retos y desafíos del Thermonuclear Experimental Reactor, desarrollado en Cadarache, con la colaboración de 33 países

### 20 **Guardianes de la seguridad**

La Inspección Residente celebra el 40 aniversario de su creación, una unidad de vigilancia permanente en las centrales nucleares de España



## ENTREVISTA

### 26 **José Luis Navarro, presidente de Enresa**

«El calendario de cierre de las centrales es un reto para todo el sector, comenzando por el propio CSN y siguiendo por las empresas españolas»

## ARTÍCULOS TÉCNICOS

### 30 **Proyecto GO-MERES de CSN/UPM sobre simulación con GOTHIC del comportamiento en contención del hidrógeno con rociadores y piscinas de supresión**

### 39 **Experiencia reguladora en el desmantelamiento de centrales nucleares**



## CIENCIA Y MÚSICA

### 46 De ondas y notas

Dúo inseparable que actúa como instrumento para comprender el universo y sus leyes, al tiempo que conmueve lo más profundo del espíritu humano con su belleza



## RADIOGRAFÍA

### 52 Elementos combustibles PWR y BWR

Diferencias más importantes entre los elementos de ambos tipos de centrales



## CSN I+D

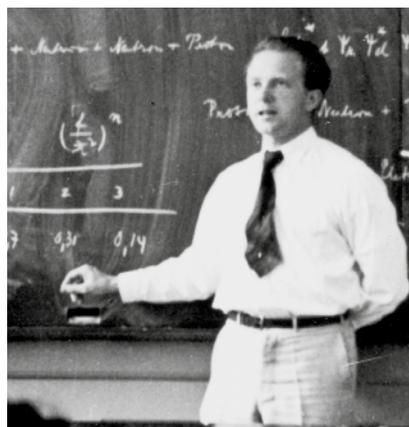
### 54 Exhalación de radón en materiales de construcción: impacto radiológico y medidas correctoras (EXradón)

Alcance y objetivos

## ENTIDADES

### 56 Instituto de Fusión Nuclear Guillermo Velarde

Referente europeo en la fusión por confinamiento inercial



## CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

### 60 Werner Heisenberg y los inicios de la mecánica cuántica

Creador del principio de indeterminación y de las bases matemáticas que darían lugar a la mecánica cuántica, es uno de los mejores físicos teóricos del siglo XX



### 65 Reacción en cadena

### 68 Panorama

### 70 Últimas publicaciones

# La clave está en los neutrones



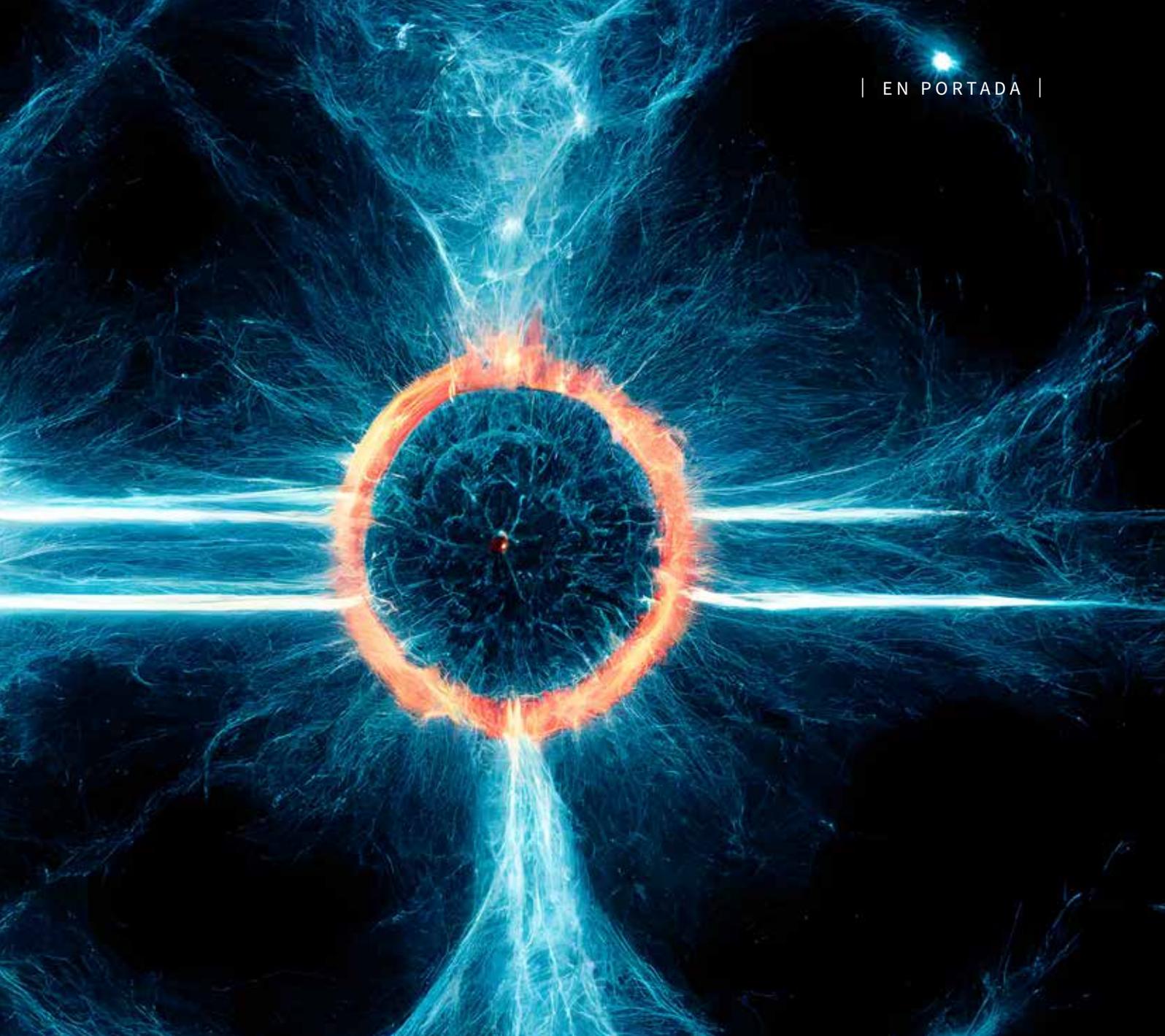
El descubrimiento del neutrón por el físico y Premio Nobel británico, James Chadwick, en 1932, representó un hito fundamental en la física moderna y en la comprensión de la estructura del átomo. Desde esa fecha, la investigación sobre neutrones es un reto fascinante. En España se estudian en la instalación HiSPANoS del CNA (Centro Nacional de Aceleradores) y, a nivel europeo, en el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) en el proyecto n\_TOF.

■ Texto: M.<sup>a</sup> José Prieto

**A**ntes de Chadwick, Walther Bothe y Herbert Becker, así como Irène Curie y Frédéric Joliot-Curie, ya habían observado ciertos efectos al bombardear berilio con partículas alfa que, inicialmente, se atribuyeron a radiación gamma; sin embargo, estos resultados no cuadraban completamente con las propiedades conocidas de las radiaciones electromagnéticas. En el laboratorio Cavendish de Cambridge, Chadwick utilizó un enfoque experimental más riguroso

para analizar las partículas expulsadas al colisionar partículas alfa con berilio. Observó que los datos solo podían explicarse suponiendo la existencia de una partícula sin carga eléctrica, pero con una masa similar a la del protón. Esta partícula neutra, a la que llamó neutrón, no solo confirmó la teoría, sino que también resolvió problemas pendientes en la física nuclear, como la explicación de la estabilidad de ciertos núcleos y la existencia de isótopos. El misterio había quedado al descubierto.

El CNA, en España, y el CERN, a nivel europeo, son dos de los organismos que se encargan de realizar investigaciones con haces de neutrones. La primera cuestión es saber qué ventajas ofrecen y por qué es clave su estudio. José Manuel Quesada Molina, catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear, coordinó desde su inicio (2000) hasta 2022 el grupo de la Universidad de Sevilla que participa en el experimento n\_TOF del CERN. El programa tiene como principal objetivo la medida de secciones eficaces de



reacciones nucleares inducidas por neutrones. «La principal característica de los neutrones, de la cual derivan sus ventajas (aunque también sus inconvenientes), consiste en la carencia de carga eléctrica. Ello les permite acercarse, por baja que sea su energía, a los núcleos atómicos (cargados positivamente por estar constituidos de protones y neutrones) e interactuar con ellos con la fuerza nuclear o fuerte, que es de muy corto alcance», explica.

Sobre la relevancia de estas partículas, apunta que «el estudio de las reacciones inducidas por neutrones es

crucial porque, además de sus aplicaciones (desde la fisión nuclear al estudio de materiales), estas desempeñan un papel esencial en la síntesis de los elementos más pesados que el hierro en las estrellas, la conocida como nucleosíntesis estelar».

Carlos Guerrero, profesor titular de la Facultad de Física de Sevilla, es coordinador de Física Nuclear Básica del CNA, la Instalación Científico-Técnica Singular, ICTS, dedicada a la investigación interdisciplinar, entre otros campos, de los neutrones, en este caso en la instalación HiSPANoS. Bajo su

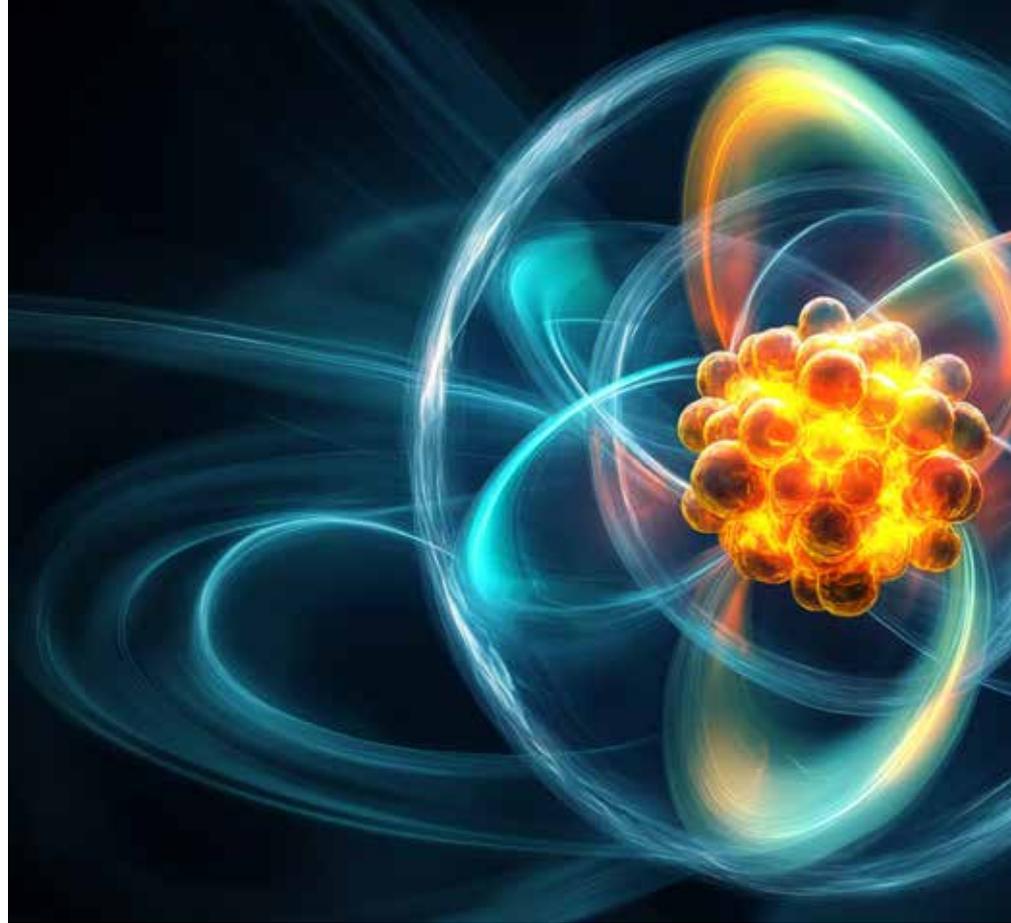
punto de vista, la cuestión relevante es qué diferencia a los neutrones de otras partículas: «al no tener carga, los hace insensibles a las fuerzas electromagnéticas ejercidas por los electrones –con carga eléctrica negativa– que rodean a los átomos. Por ello, son una radiación muy penetrante y pueden atravesar espesores importantes de plomo y hormigón.

A escala atómica, el neutrón tampoco siente la carga eléctrica positiva del núcleo y, por tanto, puede penetrar fácilmente en él, lo que los convierte en una poderosa sonda



**CARLOS GUERRERO**

*Los neutrones son una radiación muy penetrante y pueden atravesar espesores importantes de plomo y hormigón*



## Neutrones en el CNA

En el CNA de Sevilla se están llevando a cabo diferentes investigaciones. Carlos Guerrero, profesor titular de la Facultad de Física de Sevilla, hace hincapié en la fuente de neutrones HiSPANoS (Hispalis Neutron Source), la más intensa y versátil de España, que permite producir neutrones mediante un acelerador lineal de partículas. El rango de energía de los neutrones depende del modo de producción, pero abarca térmicos, epitérmicos y rápidos, es decir, neutrones de entre 25 meV y 20 MeV que cubren todo el rango de interés para las aplicaciones que se mencionan. Con estos haces de neutrones se lleva a cabo un programa de investigación propio y también se da servicio y colabora con usuarios externos, nacionales e internacionales, que acceden a la instalación normalmente a través de los llamados programas de Acceso Transnacional a infraestructuras de la Unión Europea. Aparte de aplicaciones más convencionales, como la caracterización de detectores, radiografía y tomografía mediante neutrones, o producción de radioisótopos, HiSPANoS está particularmente bien equipada para realizar medidas de captura de neutrones por activación neutrónica.

A modo ilustrativo, recientemente se ha realizado este tipo de medida en isótopos del cromo para resolver una discrepancia del 30 % en la sección eficaz observada a través de experimentos de validación en reactores experimentales y que había llevado a la Agencia de Energía Nuclear (NEA, por sus siglas en inglés) de la OCDE a incluirla en su lista de prioridades. En un ámbito completamente diferente, cabe mencionar que recientemente se han conseguido fondos para aumentar las capacidades de la instalación en relación con las medidas de producción de neutrones mediante reacciones tipo (alfa,n) de interés para la gestión de los residuos radiactivos, para nucleosíntesis estelar, e incluso para la caracterización del fondo en medidas de materia oscura en laboratorios subterráneos.

para estudiar la estructura nuclear e inducir reacciones nucleares, por ejemplo, fisión».

El siguiente punto para debatir es por qué resulta cardinal saber cómo reaccionan los neutrones de distintas energías y con todo tipo de materiales. «El estudio de las reacciones inducidas por neutrones permite desentrañar la génesis de los núcleos atómicos en las estrellas. En concreto, la magnitud fundamental es la llamada *sección eficaz de reacción*, que es proporcional a la probabilidad de que al incidir un neutrón en un núcleo se produzca un resultado concreto (recordemos que la física cuántica es esencialmente probabilística). Dicha magnitud depende del núcleo blanco, del resultado de la reacción y de la energía del neutrón incidente. Además, es esencial conocer con precisión las secciones eficaces de reacción para optimizar el diseño de reactores nucleares de fisión avanzados, ya que son cruciales para la dinámica del reactor. Igualmente, el estudio del comportamiento de diferentes materiales estructurales sometidos a un elevado flujo neutrónico (tal como el existente en los actuales reactores de fisión y, mucho más alto, en un futuro reactor de fusión nuclear) es funda-



*El estudio de las reacciones inducidas por neutrones permite desentrañar la génesis de los núcleos atómicos en las estrellas*

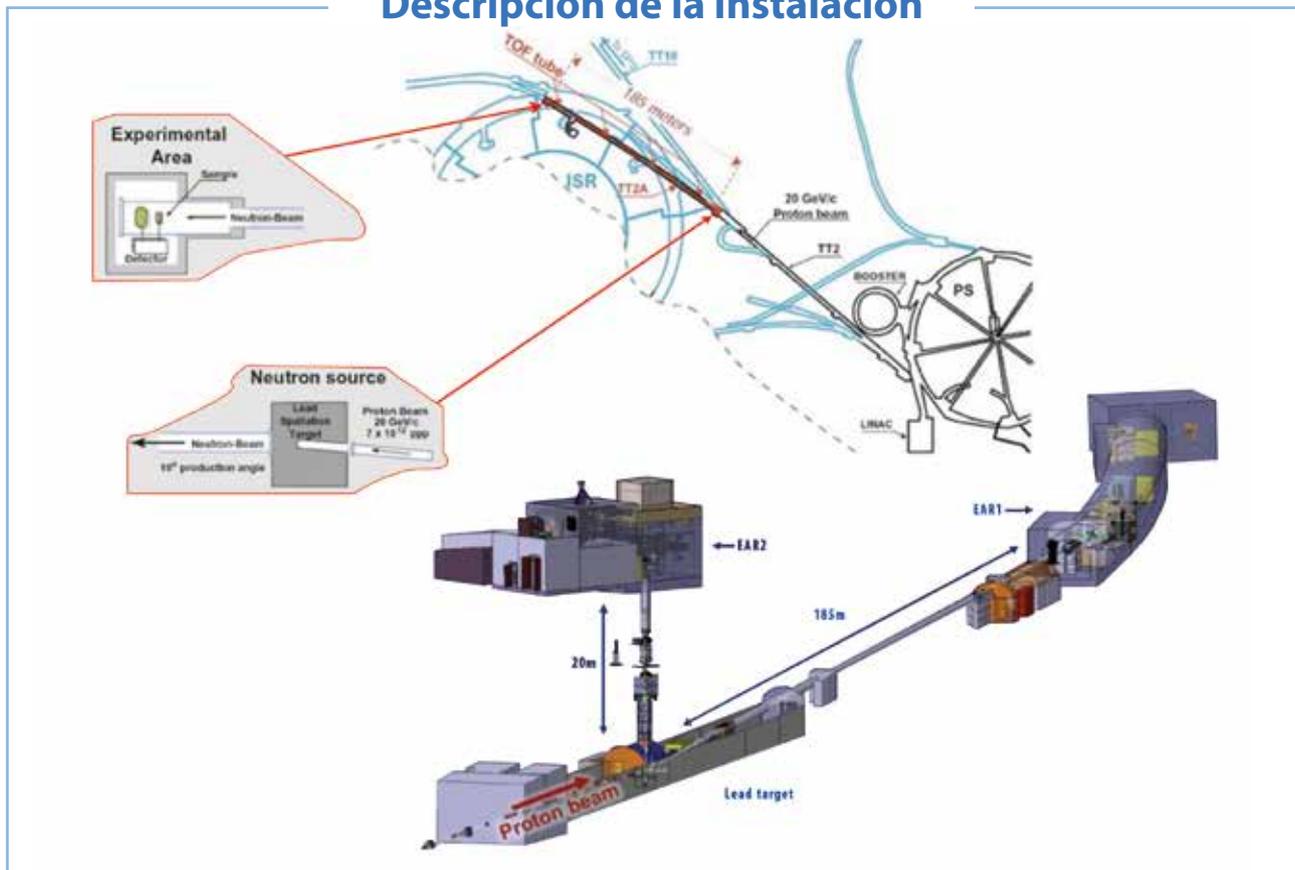
mental para el diseño de los sistemas de confinamiento», destaca José Manuel Quesada Molina.

Carlos Guerrero, que coordina desde 2022 el grupo de la Universidad de Sevilla que participa en el experimento n\_TOF del CERN, subraya que los neutrones aparecen y son importantes en situaciones muy diversas. «Resumiendo mucho, quizás demasiado, se encuentran en el seno de las estrellas, donde son responsables de la creación mediante reacciones de captura neutrónica (por las que el átomo incorpora un neutrón al núcleo, dando lugar a elementos más pesados) de la gran mayoría de los elementos que encontramos en el universo; se producen en los reactores nucleares actuales y son los responsables de mantener las reacciones de fisión en cadena que generan el 20 % de la electricidad consumida en España; también se producirán y serán elementales para extraer ener-

gía y producir combustible en los futuros reactores de fusión; además se generan en la atmósfera mediante reacciones nucleares producidas por los rayos cósmicos, radiación de alta energía que llega a la Tierra procedente del espacio, y que hay que considerar para proteger debidamente tanto los dispositivos como a los tripulantes de vuelos comerciales y suborbitales», explica.

En este caso, el daño que pueden causar a los organismos vivos «pueden usarse de forma controlada para acabar con algunos tipos muy particulares de tumores mediante la técnica BNCT, una forma experimental de tratamiento contra el cáncer». Y matiza que «en cada uno de estos ejemplos los neutrones involucrados tienen energías (medida en unidades de electronvoltio, eV) muy diferentes, desde milésimas de eV en los reactores nucleares, a cientos de millones de

## Descripción de la instalación



En la instalación de neutrones HiSPANoS del CNA se lleva a cabo un programa de investigación propio y también se da servicio y colabora con usuarios externos, nacionales e internacionales, que acceden a la instalación normalmente a través de los llamados programas de Acceso Transnacional a infraestructuras de la Unión Europea. En la foto, montaje experimental para medida de reacciones ( $\alpha, n$ ) por parte de la Colaboración MANY con módulos del detector MONSTER.



El CERN hospeda la instalación n\_TOF, donde se estudian reacciones nucleares producidas por neutrones entre meV y GeV a partir de una iniciativa del Premio Nobel Carlo Rubbia

eV en la atmósfera, pasando por decenas de miles de eV en las estrellas. Es por ello necesario conocer el tipo de reacciones nucleares y la probabilidad de que estas se produzcan entre neutrones y un muy amplio abanico de materiales en un rango de energía que abarca más de nueve órdenes de magnitud».

### Próxima generación de reactores

Un eslabón central serán las aplicaciones técnicas derivadas del estudio de los neutrones. Tal y como explica José Manuel Quesada, «el estudio de las reacciones inducidas por neutrones contribuye a la mejora de los diseños de la

próxima generación de reactores de fisión nuclear, en aras de maximizar la seguridad y la producción de energía, al tiempo que se disminuye el impacto ambiental de los residuos, mediante la minimización de la producción de isótopos de vidas más largas. Tanto para la mejora del diseño de los reactores de fisión nuclear como para el desarrollo del futuro prototipo demostrativo de fusión, es fundamental el estudio experimental de los efectos de la irradiación por neutrones en los materiales estructurales de sus recintos de contención y sistemas auxiliares».

Fuera del ámbito estricto de la física nuclear, «los haces de neutrones (producidos con un acelerador de partículas, normalmente de protones o deuterio, que inciden sobre un blanco o extraídos de un reactor nuclear) son una valiosísima herramienta para estudios de Química, Biología y Ciencia de Materiales, como atestigua la construcción en Uppsala, Suecia, de la ESS (European Spallation Source), a cuya sede optó España en su momento y que tiene en Bilbao uno de sus centros de desarrollo. En Grenoble, Francia, otra instalación internacional, el ILL (Institut Laue-Langevin), utiliza

## La instalación n\_TOF del CERN



Entre las investigaciones sobre neutrones que se están desarrollando en el CERN, José Manuel Quesada, catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear, resalta la instalación n\_TOF (acrónimo de *Neutron Time of Flight* o, en castellano, [medidas] de tiempo de vuelo de neutrones). La carencia de carga eléctrica hace que solo se pueda determinar la energía de los neutrones mediante la medida del tiempo invertido en recorrer la distancia entre el blanco de espalación y el detector, de forma que cuanto mayor sea esta, menor es el error cometido.

En el caso de la instalación n\_TOF, una fracción del haz de protones del PS (acrónimo de Proton Synchrotron) del CERN es deflectada hacia el blanco de espalación (el resto se emplea para los otros experimentos que tienen lugar simultáneamente, en particular, el actual buque insignia y referente de la Física de Partículas a nivel mundial: el LHC [acrónimo de Large Hadron Collider o Gran Colisionador de Hadrones]).

La instalación n\_TOF del CERN posee en su primera zona experimental (EAR1) la mayor longitud (200 m, prácticamente en horizontal) entre las de su tipo, que permite un excelente grado de resolución en energía de las secciones eficaces de reacciones producidas por neutrones de interés en tecnología y astrofísica nucleares. La segunda zona experimental (EAR2), con unos 20 m de distancia en vertical desde el blanco de espalación, alcanza un compromiso entre una razonable resolución energética y un elevado flujo de neutrones, que permite realizar en ella difíciles medidas con extraordinariamente pequeñas muestras de isótopos muy radiactivos (de gran interés en astrofísica nuclear). Además, la más reciente zona experimental (NEAR) junto al blanco de producción subterráneo permite realizar medidas de gran interés tecnológico mediante el estudio de los efectos producidos en diferentes materiales sometidos a irradiación con el elevadísimo flujo de neutrones allí disponible.

desde hace años neutrones extraídos de un reactor nuclear para múltiples estudios interdisciplinares», detalla el experto del CERN.

El estudio de los neutrones facilitará el diseño de los reactores nucleares avanzados de fisión y fusión, tal y como revela Carlos Guerrero: «en fusión, aunque los neutrones son claves para la producción del calor que se convertirá en electricidad y del tritio que usaría como combustible, los retos actuales en el diseño de reactores de fusión tienen que ver principalmente con el mantenimiento del confinamiento del plasma durante el tiempo suficiente, de modo que salvo para algunas reacciones nucleares

específicas, el conocimiento actual de las secciones eficaces de neutrones involucradas parece ser suficiente. Por el contrario, los reactores nucleares de fisión actuales y la gran mayoría de aquellos en fase de diseño, operan en modo de criticidad, es decir, el número de neutrones producidos por la fisión debe coincidir exactamente con el número de neutrones absorbidos y fugados del reactor. Los reactores actualmente en fase de diseño, los denominados de IV Generación, persiguen una operación más segura y un uso más eficiente del combustible, así como la minimización de los residuos generados; lo cual se consigue mediante

novedosas configuraciones con diferentes composiciones de combustibles, materiales estructurales, refrigerante, moderador (actualmente agua) y, por último, el uso en algunos casos de neutrones rápidos (de alta energía) en lugar de térmicos (de baja energía) para mantener la reacción en cadena. Al ser el equilibrio de criticidad tan delicado, los cálculos neutrónicos deben ser muy precisos y esto solo se consigue con base en un conocimiento muy preciso de las secciones eficaces de neutrones para reacciones y materiales cuya importancia es mucho menor para el caso de los reactores actuales, pero que es fundamental para el diseño de los

futuros. En este sentido, los experimentos denominados de validación» en reactores nucleares experimentales sirven para identificar aquellas secciones eficaces que necesitan ser mejoradas, ocupándose la Agencia de Energía Nuclear (NEA, por sus siglas en inglés) de la OCDE de recopilar los más prioritarios en la denominada «High Priority Request List».

### Gestión de los residuos radiactivos

Descubrir cómo y con qué probabilidad interaccionan los neutrones con la materia ayudará a comprender parámetros fundamentales para la gestión de los residuos radiactivos. José Manuel Quesada reconoce que será «clave en el desarrollo de los dispositivos ADS (acrónimo de Accelerator Driven System, o Sistema Mantenido por Acelerador),



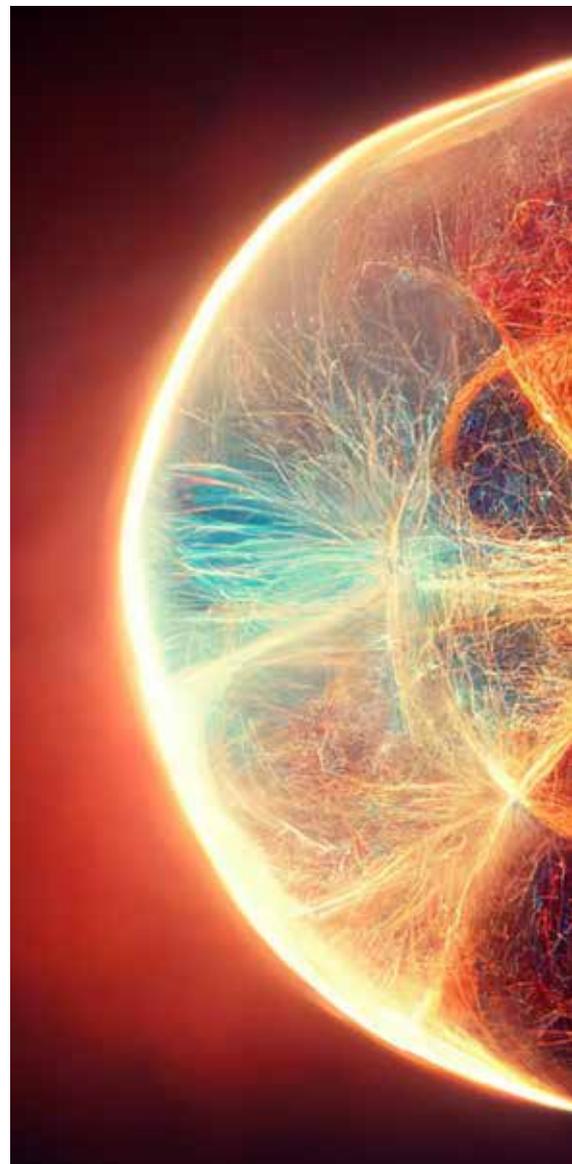
JOSÉ MANUEL QUESADA

*El estudio de las reacciones inducidas por neutrones contribuye a la mejora de los diseños de la próxima generación de reactores de fisión nuclear, en aras de maximizar la seguridad y la producción de energía*

destinados a transmutar los isótopos más longevos de los residuos nucleares ya producidos en otros de vidas medias más cortas al tiempo que se genera energía mediante fisión nuclear de forma más segura (la reacción se para en cuanto se apaga el acelerador de protones que la mantiene) y con una menor producción de residuos».

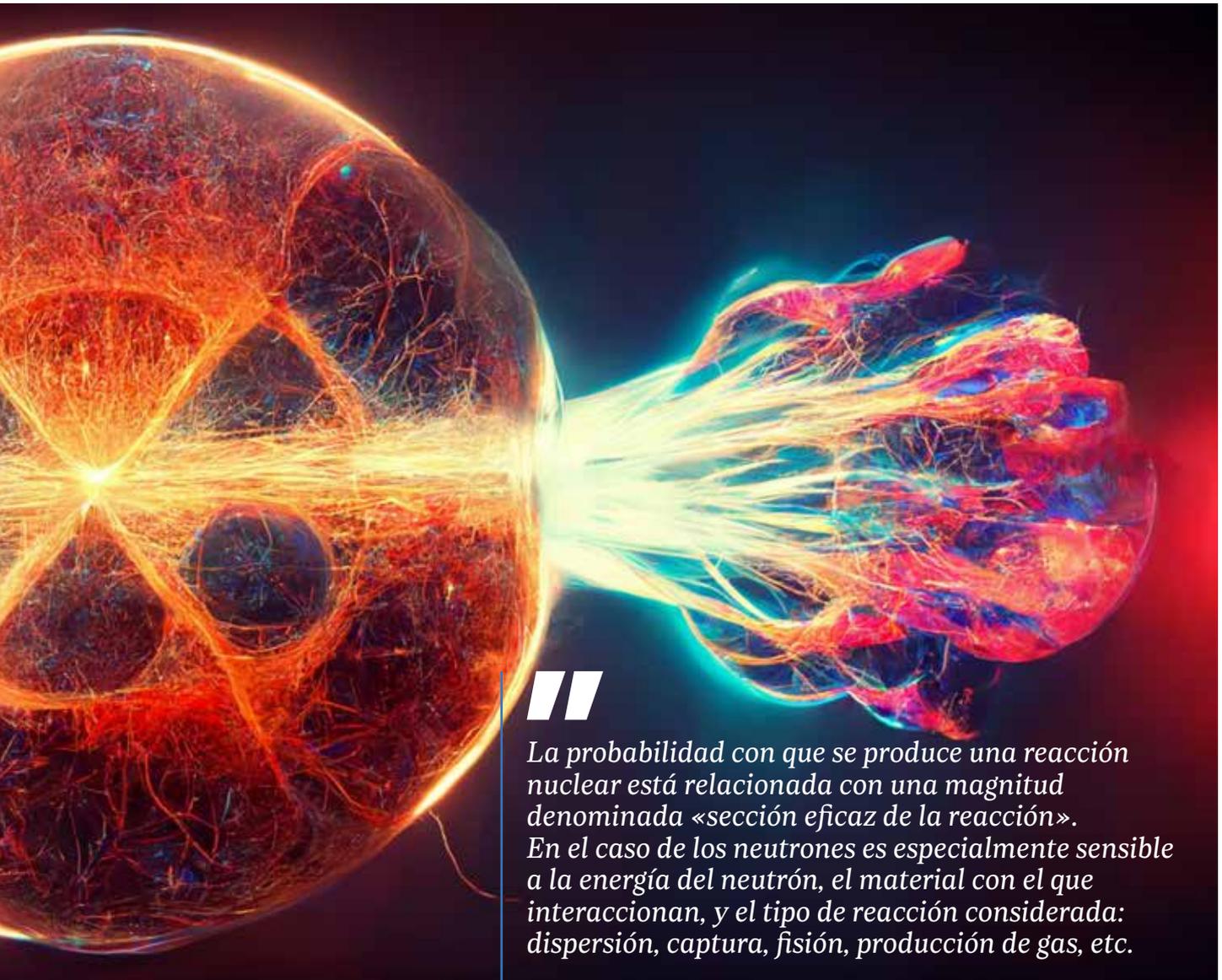
Para el experto del CNA, «la probabilidad con que se produce una reacción nuclear está relacionada con una magnitud denominada «sección eficaz de la reacción», que en el caso de los neutrones es especialmente sensible a la energía del neutrón, el material con el que interaccionan, y el tipo de reacción considerada: dispersión, captura, fisión, producción de gas, etc. Por ejemplo, conocer las secciones eficaces de fisión nos permite diseñar los reactores nucleares calculando con precisión la cantidad de fisiones ocurridas en el combustible nuclear. Estas son las que producen la energía útil, pero también y como resultado, los fragmentos de fisión como el  $^{90}\text{Sr}$  o el  $^{137}\text{Cs}$  que dominan la actividad del combustible gastado durante los primeros cientos de años. Por otro lado, la captura de neutrones genera los actínicos como el plutonio, neptunio o americio, responsables de prolongar la radiotoxicidad del combustible gastado durante decenas de miles de años. Al estudiar ambas reacciones, podemos conocer la composición del combustible nuclear durante la operación y retiro de las barras una vez que se han agotado, siendo este el primer paso para la correcta gestión del combustible gastado como residuo nuclear. Por otro lado, además de las secciones eficaces, hay otras magnitudes como las vidas medias (una medida del tiempo que tarda en desintegrarse un isótopo radiactivo) y modos de desintegración de los elementos radiactivos que conforman los residuos que son igualmente fundamentales a la hora de calcular, por ejemplo, el calor emitido y la evolución de la composición del combustible gastado con el paso de los años, necesarios ambos para una correcta y segura gestión de los mismos».

Como conclusión, Carlos Guerrero puntualiza que «en todo proceso



de gestión de residuos se trata de seguir la regla de las 3 *erres* «Reducir, Reutilizar y Reciclar», y en este sentido el combustible gastado actual posee un gran potencial como combustible de reactores nucleares con diseños avanzados que permitirían avanzar en línea con la mencionada regla.

Por supuesto, para ello es necesario conocer en mucho más detalle que en la actualidad el comportamiento de los neutrones cuando se enfrentan núcleos de plutonio, neptunio o americio que hoy en día son considerados simplemente residuos, pero podrían ser la base del combustible nuclear del futuro».



*La probabilidad con que se produce una reacción nuclear está relacionada con una magnitud denominada «sección eficaz de la reacción». En el caso de los neutrones es especialmente sensible a la energía del neutrón, el material con el que interaccionan, y el tipo de reacción considerada: dispersión, captura, fisión, producción de gas, etc.*

### **Aportaciones a la astrofísica nuclear**

El estudio de los neutrones aporta importantes claves al campo de la astrofísica nuclear. Como señala José Manuel Quesada «la generación de los núcleos atómicos más pesados que el hierro tiene lugar en las estrellas (gigantes rojas, supernovas, estrellas de neutrones...) mediante procesos de captura neutrónica secuenciales, que compiten con la desintegración radiactiva en los isótopos llamados puntos de ramificación; por lo tanto, es preciso conocer con precisión las secciones eficaces de captura neutrónica de dichos isótopos para poder simular las complejas cascadas de capturas y desintegraciones cuyas predicciones deben

ser comparadas con la abundancia isotópica observada en el cosmos».

El coordinador de Física Nuclear Básica del CNA explica para *Alfa* cómo «las estrellas en fases más avanzadas que nuestro Sol tienen una estructura compleja en la que no solo hay hidrógeno y helio, sino que mediante reacciones de fusión nuclear se logran sintetizar elementos como el carbono, el oxígeno, y el resto de los elementos más ligeros que el hierro. Todos los elementos más pesados que encontramos en nuestro planeta, desde el cobalto, el níquel y el cobre hasta el plomo y el bismuto, se producen mediante reacciones nucleares de captura de neutrones a cientos de millones de grados en las

estrellas masivas y en procesos explosivos como las supernovas y las colisiones de estrellas de neutrones o agujeros negros. Por ello, los estudios de evolución y nucleosíntesis estelar necesitan incluir los mecanismos por los que estos neutrones son generados y absorbidos para producir nuevos elementos, es decir, las secciones eficaces de producción y de captura de neutrones en las centenas de núcleos que se distribuyen entre el hierro y el bismuto. Conforme mejora el conocimiento de estas magnitudes a través de nuevos experimentos, los cálculos de nucleosíntesis ganan en exactitud y permiten avanzar en el conocimiento del funcionamiento de las estrellas y de la evolución química de nuestra galaxia». ■



# Continúa el camino hacia la energía de fusión

La fusión nuclear promete una energía abundante, segura y limpia. A pesar de la necesidad y la prisa por disponer de ella, lo que ayudaría decisivamente a la descarbonización del planeta, para que sea una realidad será necesario mantener el esfuerzo que posibilite generar electricidad de manera segura y económica. Los desafíos y los retos continúan.

■ Texto: Pura C. Roy

La fusión es una reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se unen para formar otro núcleo más pesado, generalmente liberando partículas en el proceso. Estas reacciones pueden absorber o liberar energía. Para que tenga lugar una reacción de fusión, es necesario alcanzar altas cotas de energía que permitan que los núcleos se

aproximen a distancias muy cortas en las que la fuerza de atracción nuclear supere las fuerzas de repulsión electrostática. Existen distintas formas de conseguir esta fusión, pero la que mayor inversión ha exigido hasta ahora es la fusión por confinamiento magnético. En esta, las partículas eléctricamente cargadas del plasma son atrapadas en un espacio reducido por la acción de un campo magnético. El

dispositivo más desarrollado tiene forma toroidal y es un Tokamak.

El gran proyecto para ello se denomina ITER. Y no en vano ITER significa camino en latín. Aunque durante los últimos cincuenta años de experimentos en el ámbito de la fusión el rendimiento de los dispositivos se ha multiplicado, este todavía tiene que aumentar para alcanzar el nivel necesario para una



El proyecto ITER está financiado por 33 países / Fotos: ITER.org

central de fusión. ITER también es el acrónimo de las siglas International Thermonuclear Experimental Reactor (Reactor Experimental Termonuclear Internacional). La instalación de este proyecto se desarrolla en Cadarache, al sur de Francia, y cuenta con la colaboración de treinta y tres países.

La Organización ITER es una organización intergubernamental creada mediante un acuerdo internacional firmado en 2006 y establecida formalmente el 24 de octubre de 2007 tras su ratificación por todas las Partes. Los miembros del ITER son la Unión Europea que funciona como un solo país, China, India, Japón, Corea del Sur, Rusia y los Estados Unidos. La Unión Europea aporta el 40 % de la financiación y el resto de los países aportan el 60 % restante.

En los últimos años se han producido avances notables en materia de tecnología de fusión, tanto en proyectos de I+D privados como públicos. Pero, para derribar por completo los obstáculos que impiden la comercialización de la fusión, se necesitará más investigación en materiales y más ingeniería de precisión. «Siguen existiendo desafíos tecnológicos, de financiación y de recursos humanos. Al final, tenemos que admitir que llevará tiempo», comenta Mercedes Medrano, responsable de ingeniería del Laboratorio Nacional de Fusión del Ciemat.

«Las obras de ITER comenzaron en 2010 en Caradache y está todavía en fase de construcción. El edificio del Tokamak ya ha recibido los primeros componentes como la parte inferior del criostato y se están instalando también líneas criogénicas. El siguiente componente funda-

mental, aunque todos lo son, es la cámara de vacío que se ensamblará por sectores que son aportados por siete de los socios del proyecto», explica Mercedes Medrano.

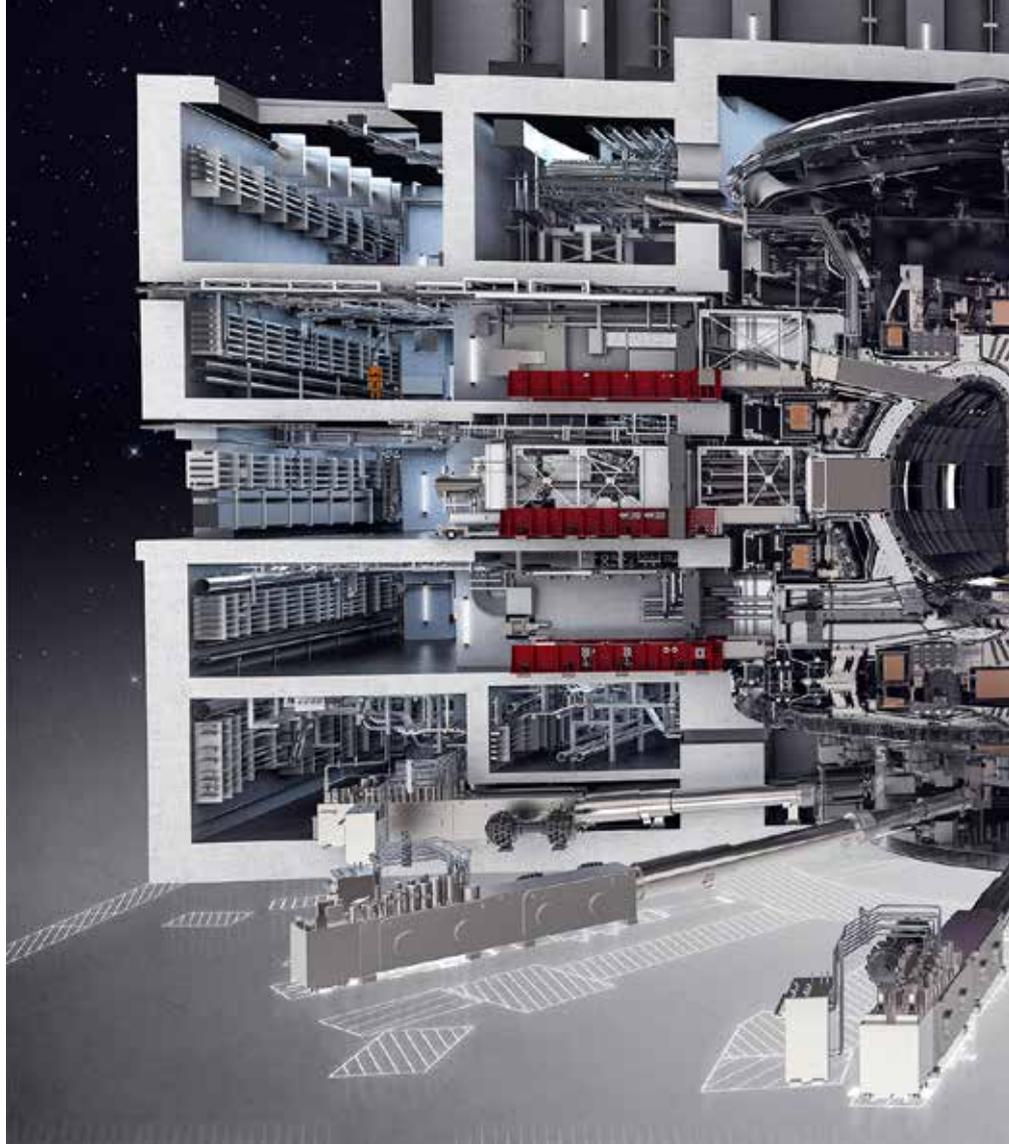
Con sus 23 000 toneladas de peso y casi 30 metros de altura, el ITER será una ingeniería soberbia. El Tokamak ocupará el centro de un complejo de 180 hectáreas donde se construirán infinidad de edificios para instalaciones auxiliares. Las enormes dimensiones del ITER superarán con creces las de los reactores experimentales de fusión de mayor tamaño actualmente en funcionamiento.

El reactor del ITER utiliza una combinación de sistemas caloríficos, potentes imanes y otros dispositivos para crear reacciones de fusión en plasmas extremadamente calientes y liberar así energía. Los campos magnéticos resultantes



MERCEDES MEDRANO

*ITER será el primer dispositivo de fusión que conseguirá una ganancia neta de energía, así como el primer dispositivo que mantendrá la fusión durante periodos largos de tiempo*



mantienen unidas las partículas cargadas y las hacen girar dentro de la vasija del reactor, que tiene forma de toroide, o como coloquialmente se dice de dónut o rosquilla, para que puedan fusionarse y producir energía de fusión. Su poderoso campo magnético confina el plasma caliente a temperaturas extremadamente altas.

### **Viabilidad de la fusión**

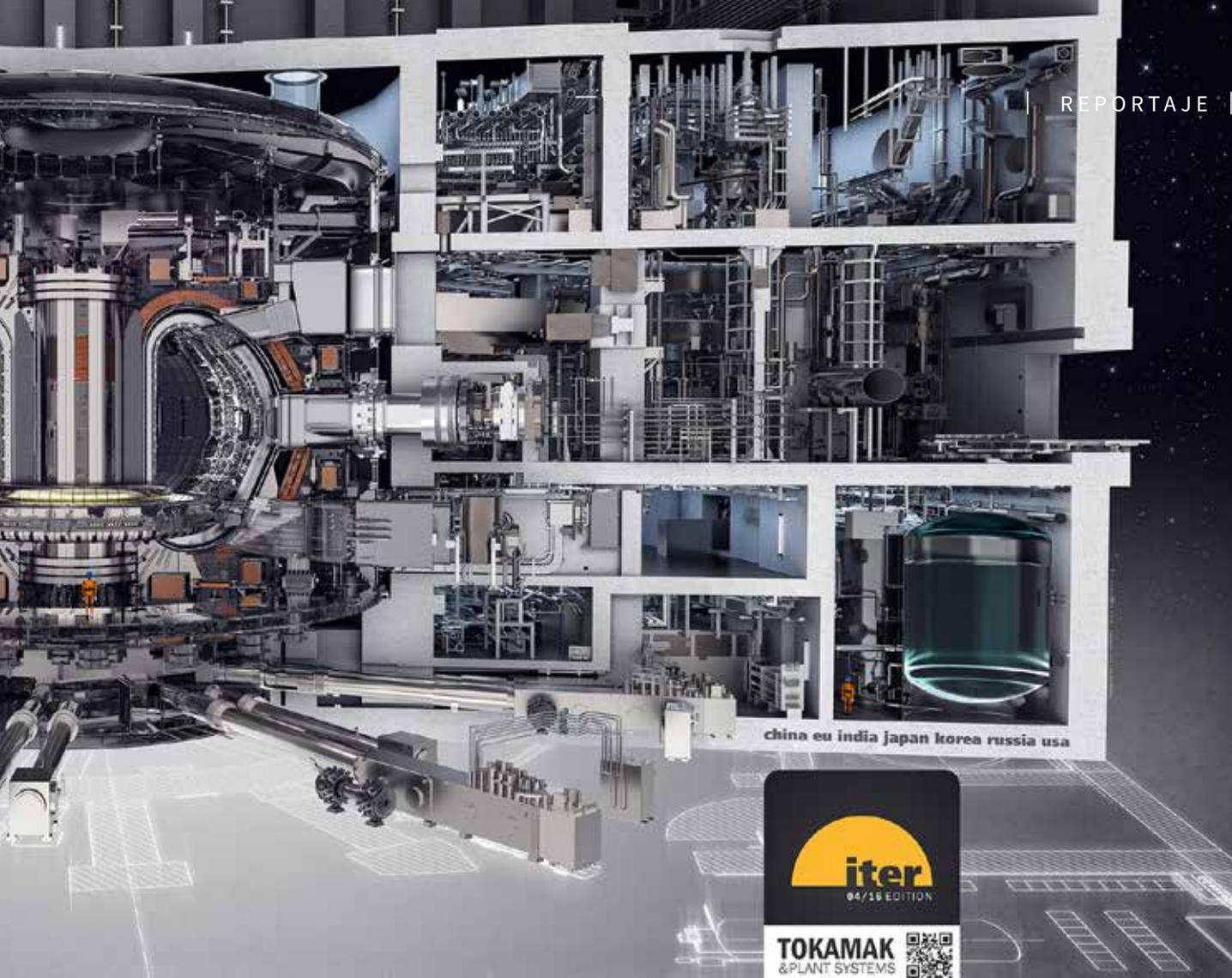
«Entre nuestros objetivos está el demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear para ser usada en un futuro en reactores comerciales», explica Mercedes Medrano. «El ITER es una máquina experimental, una fase intermedia de lo que son laboratorios de fusión y los próximos reactores. ITER será el primer dispositivo de fusión que conseguirá una ganancia neta de energía (es decir, se produce más energía que la ab-

sorbida por el funcionamiento del sistema), así como el primer dispositivo que mantendrá la fusión durante periodos largos de tiempo. También será el primero en poner a prueba las tecnologías integradas, los materiales y la física necesarias para la producción comercial de la electricidad de fusión».

Hay que tener claro, como explica Mercedes Medrano, que «el ITER no va a poner la energía generada en la red eléctrica. Como experimento que todavía es, su misión es demostrar que se pueden mantener esas reacciones con el calor generado por la energía cinética de las partículas alfa que se generan como producto de la reacción. Esto será fundamental para los futuros reactores comerciales. Será importante que las reacciones sean automantenidas y en condiciones del calentamiento extremo para mantener dichas reacciones».

Para José Manuel Perlado, presidente del Instituto de Fusión Nuclear, de la ETSI industriales de Madrid, el ITER «es un sistema muy complejo tanto técnico como de gobernabilidad, porque al intervenir muchos actores, las técnicas de fabricación deben ser consensuadas». Para este especialista en fusión inercial, «la seguridad del sistema y las oportunas licencias comerciales serán otras cuestiones para tener en cuenta en el futuro. Pero todo ello vendrá después de que arranque el ITER». Actualmente La Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) es el organismo francés que vigila la seguridad del ITER. Lo que sí tiene claro José Manuel Perlado es que «con el ITER se van a aprender muchas lecciones, aunque no todo se pueda hacer».

El ITER tiene como objeto hacer viable la construcción de un reactor DEMO que pueda servir de



prototipo de los futuros reactores comerciales que permitan una producción regular y continua de energía, para demostrar que la fusión nuclear controlada puede generar energía eléctrica neta. Este es un paso muy importante y posiblemente en un futuro cada país tendrá el suyo cuando sean viables económicamente. Posiblemente cada país querrá tener su propia patente. La colaboración público-privada ya se está dando en el consorcio ITER. «En Europa ya hay empresas dedicadas a las aplicaciones en fusión nuclear para dar respuesta a los desafíos tecnológicos y científicos pendientes», manifiesta Mercedes Medrano.

En España, la estrategia nacional en fusión se está llevando a cabo conjuntamente por el CDTI, el Ciemat y el Ministerio para la Transición Ecológica.

Carlos Hidalgo, director del Laboratorio Nacional de Fusión del Ciemat, resume para *Alfa* cuáles son los desafíos de la fusión magnética: «Uno es demostrar que los materiales de un reactor pueden resistir un tiempo suficientemente largo en un entorno extraordinariamente hostil, sobre todo por el efecto de los neutrones energéticos. El segundo es que un reactor tiene que ser autosuficiente. El combustible que utiliza es deuterio, que es fácil de conseguir, y tritio, que inicialmente procede de reactores de fisión, pero posteriormente debe generarse en el propio reactor. El tercero es que, aunque se desarrolle una configuración magnética muy eficiente, que permita mantener la materia con temperaturas unas diez veces la del centro del Sol y con unos campos magnéticos 100 000 veces el campo magnético terrestre, siempre habrá unos flujos de energía que llegan a las paredes del reactor y que

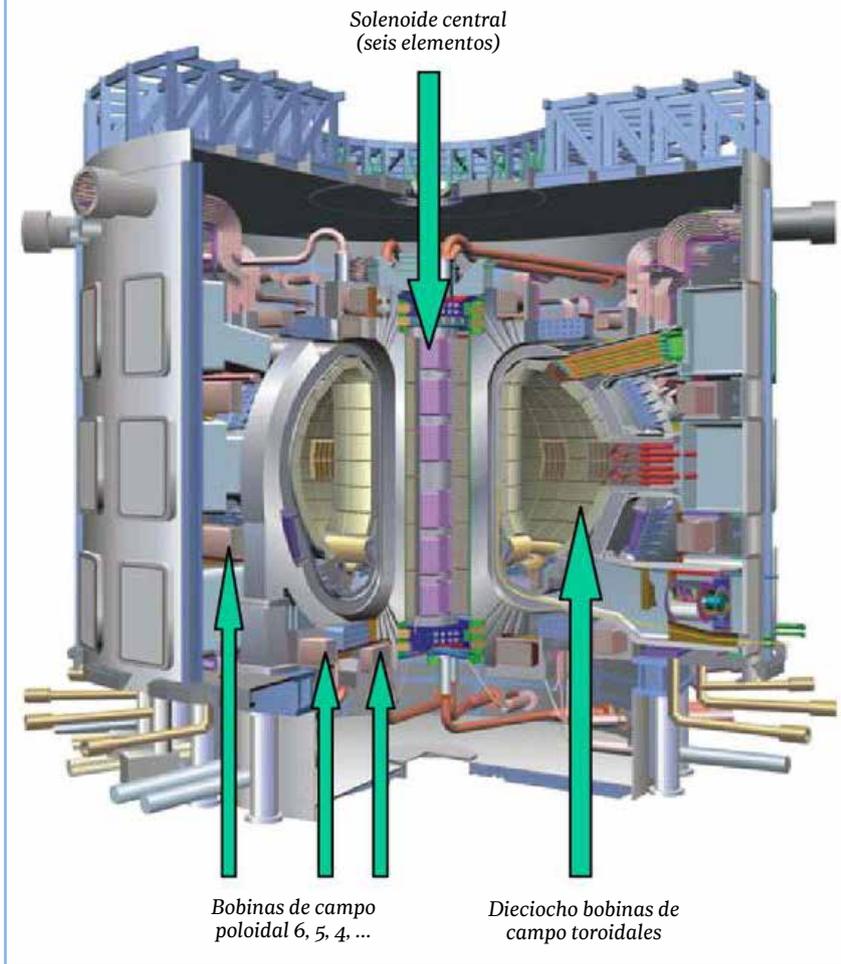
en ITER serán de unos diez Mw/m<sup>2</sup>. Es esencial desarrollar materiales que soporten esas densidades de potencia de forma continua».

### Participación española

España participa en el ITER de manera muy activa. Según el CDTI, desde 2005 para las empresas españolas ha representado en torno a 2000 millones de euros y, solo en 2023, el retorno español en contrataciones ha superado los 146 millones de euros. Desde 2008, las empresas españolas han conseguido más de 650 contratos para el proyecto ITER, que ascienden a más de 1468 millones de euros.

España está fabricando los primeros componentes europeos para el proyecto, y también participa en el ensamblaje de los nueve sectores de la cámara de vacío y de los 54 puertos del reactor. «Los elemen-

## Vista seccional del reactor tokamak del ITER



tos hay que soldarlos *in situ*. Por ello es un reto y un desafío de ingeniería. No hay precedentes en los tamaños que se manejan, esto es lo que está produciendo retrasos en la construcción. El ITER necesita grandes imanes, instrumentación sofisticada, desarrollo, diseño de sistemas de diagnóstico y sistemas de toma de datos. En todos estos campos trabaja España, así que nos podemos sentir muy orgullosos», afirma Mercedes Medrano.

Además, la Agencia Europea de ITER, Fusion for Energy (F4E), está ubicada en Barcelona, con cuatrocientos científicos, ingenieros, personal administrativo; el 32 % de ellos son españoles. Actualmente se está ultimando la puesta en marcha de una nueva instalación LITEC (Lithium Technologies CIEMAT),

un laboratorio para la investigación de soluciones tecnológicas avanzadas, cuyo principal objetivo es validar los sistemas de purificación de litio del proyecto internacional IFMIF-DONES, una infraestructura fundamental y necesaria en la que se podrán probar los materiales que se utilizarán en la construcción de los futuros reactores de fusión nuclear. Esta nueva instalación estará en Granada. Con un coste aproximado de más de 700 millones de euros, esta fuente de neutrones es uno de los pilares fundamentales del programa de fusión y representará una oportunidad industrial y tecnológica sin precedentes para las empresas españolas. Una gran inversión para probar, validar y cualificar los materiales que se utilizarán en futuras plantas de energía de fusión.



JOSÉ MANUEL PERLADO

*El Reactor Experimental Termonuclear Internacional es un sistema muy complejo tanto técnico como de gobernabilidad, porque al intervenir muchos actores, las técnicas de fabricación deben ser consensuadas*

José Manuel Perlado opina también que este proyecto será fundamental para saber la durabilidad de los materiales bajo ciertas condiciones, «no sabemos bien cómo los neutrones agreden a los materiales para producir cambios en sus propiedades mecánicas y ópticas. Se han hecho irradiaciones equivalentes, pero no con tantos neutrones que se van a dar en el reactor del ITER. Así que esto es clave. Europa tiene un gran interés y está realizando un gran esfuerzo en validar toda la tecnología del tritio».

Para el investigador español Juan Knaster, que trabaja en Cadarache como representante de Fusion for Energy (F4E) en la organización ITER, «uno de los desafíos será cumplir los plazos que tenemos por delante». También opina que la

representación española está muy bien proporcionada dentro de los treinta y tres países participantes del proyecto. Juan Knaster no duda en calificar al ITER, a pesar de los retrasos, como el gran proyecto en fusión magnética mundial y un ejemplo y punto de referencia para todas las *startups* del mundo de la fusión. Cada *startup* se centra en alguna tecnología específica para su desarrollo, ITER no descarta ninguna necesaria, como materiales, diagnósticos o generación del tritio. «En estos momentos se está tejiendo la colaboración pública-privada, que en el futuro será fundamental», afirma. La IAEA está involucrándose de manera muy dinámica en este aspecto con la misma visión sobre ITER que Juan Knaster menciona.

Juan Knaster no tiene duda al afirmar que España aporta muchísimo, «es uno de los países de referencia a nivel mundial y no es una exageración afirmarlo. El Ciemat tiene un peso internacional importantísimo, como lo tendrá en el futuro laboratorio de Granada IFMIF/DONES. ITER logrará demostrar que podemos controlar el plasma con reacciones nucleares de manera estable, ya que una vez conseguido el salto a la comercialización será asequible, pero creo que no será posible tener megavattios en la red hasta muy entrados los años cuarenta».

Mirando también al futuro, Mercedes Medrano piensa que los reactores de fusión comerciales a desarrollar serán más compactos: «la fusión magnética va encaminada a la compactación del sistema gracias a los superconductores de alta temperatura».

Las grandes ventajas de esta energía bien merecen el esfuerzo que se está realizando. Los futuros reactores de fusión no generarán desechos nucleares de actividad alta y período largo, y en un reactor de fusión es prácticamente imposible que se produzca un accidente de fusión del núcleo. Otro dato importante es que la fusión nuclear no emite dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, pero como dice José Manuel Perlado, también hay que saber que «siempre que haya neutrones habrá residuos. Por ello la legislación será importantísima».

Al ITER se le considera el quinto proyecto más costoso de la historia de la ciencia, después del Proyecto Manhattan, del Programa Apollo, la Estación Espacial Internacional y el desarrollo del sistema GPS. Pero las mayores potencias tecnológicas del mundo siguen trabajando juntas en su construcción. ■

# Guardianes de la seguridad

La Inspección Residente celebra el 40 aniversario de su creación. Se trata de una unidad de vigilancia permanente en las centrales nucleares en España, fundamental para que operen con seguridad.

■ Texto: Eugenia Angulo | Fotos: CSN

La Inspección Residente del CSN cumple cuatro décadas de funcionamiento en España con una misión principal: supervisar de manera continua y directa las operaciones de las centrales nucleares. Desde 1984, los inspectores residentes han desempeñado un papel fundamental en la vigilancia y el cumplimiento de la normativa de seguridad nuclear y de protección radiológica, garantizando que las instalaciones nucleares operen dentro de los parámetros de seguridad establecidos. Esta labor se basa en una rigurosa supervisión diaria y en la verificación de los protocolos de emergencia y las mejores prácticas de operación y mantenimiento de acuerdo con la legislación vigente. Así, el programa ha jugado un papel decisivo en la mejora continua de la seguridad en las instalaciones nucleares españolas.

**E**l pasado junio se produjo un nuevo enfrentamiento entre Irán y los países occidentales en torno al programa nuclear iraní. Los miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica aprobaron una resolución, con los votos en contra de Rusia y China, que censuraba a Irán por su reiterada falta de cooperación desde hace años respecto a un tema crucial: la inspección.

De hecho, la inspección de las instalaciones nucleares por parte de los organismos reguladores es fundamental para garantizar su operación con seguridad y para cumplir con los tratados internacionales. En España, el CSN creó y puso en marcha en 1984, hace ahora cuarenta años, el programa de Inspección Residente para reforzar la supervisión y seguridad de las centrales nucleares. Desde entonces,

un equipo de inspectores se encarga de realizar inspecciones diarias y de supervisar *in situ* la operación de cada una de las plantas para asegurar que cumplen con la legislación vigente, así como con las condiciones de operación de cada una de ellas. Durante estas cuatro décadas, el programa se ha convertido en uno de los pilares decisivos para garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares españolas y la protección radiológica de la población y el medioambiente.

«En un principio, la Inspección Residente se planteó para solucionar un problema puntual en la central nuclear Cofrentes. El pleno que había entonces en el CSN decidió enviar a un inspector con un objetivo muy concreto. Posteriormente, se analizó y se concluyó que podía ser bueno que hubiera un inspector residente en cada una de las cen-

trales y, a partir de ahí, se fue instalando el programa con el objetivo de tener una persona por central», explica Teresa Vázquez Mateos, directora técnica de Seguridad Nuclear del CSN.

El referente en el que se inspiró España para crear su propia Inspección Residente fue el organismo regulador de Estados Unidos, la Nuclear Regulatory Commission (NRC, por sus siglas en inglés), que entonces ya contaba con inspectores residentes. «Nuestro organismo de referencia internacional siempre fue la NRC, porque el diseño de nuestras centrales era estadounidense, nuestras centrales de referencia eran las estadounidenses, y también lo era la normativa de referencia que se utilizó para su licenciamiento. Cuando se creó el CSN también lo hizo a imagen y semejanza del organismo regulador



*El referente en el que se inspiró España para crear su propio cuerpo de inspección fue el organismo regulador de Estados Unidos, la Nuclear Regulatory Commission, que entonces ya contaba con inspectores residentes*

americano. Ellos tenían inspectores residentes y tratamos de copiar esa idea», añade.

El resto de los países con centrales nucleares también cuenta con programas de inspección, pero no todos tienen inspectores de forma diaria en las plantas. Francia, por ejemplo, no cuenta con inspectores residentes como tales, sino que su organismo regulador tiene sedes regionales desde las que hacen inspecciones a las centrales.

### Los ojos y oídos del CSN

En la actualidad, el programa cuenta con doce inspectores residentes en las centrales nucleares actualmente operativas: dos en Cofrentes, dos en Trillo, tres en Almaraz, dos en Vandellós II y tres en Ascó. En Santa María de Garoña hay un inspector residente y en Juzbado,

que no es una planta de producción de electricidad sino una instalación nuclear que fabrica elementos combustibles, no existe la figura del inspector residente, pero sí recibe inspecciones mensuales. Además, el programa cuenta con otros tres inspectores en la sede del CSN en Madrid, que llevan a cabo las inspecciones mensuales de Juzbado y labores de refuerzo cuando algún miembro del personal está de baja, hay sobrecargas y es necesario enviar a alguien más.

Hay dos tipos de inspectores: el residente y el residente adjunto. Las centrales que tienen dos unidades, como Ascó y Almaraz, tienen tres inspectores: un residente y dos residentes adjuntos. «Esto también ha evolucionado. Al principio, solo había un residente, pero a partir de los años noventa se comprobó que tenían muchas responsabilidades y

era necesario un refuerzo. Fue entonces cuando se decidió enviar a dos personas. Con posterioridad, se aprobó que hubiera tres personas en las centrales con dos reactores», explica Vázquez. Los inspectores tienen una limitación temporal – actualmente es de diez años – para estar en la instalación, antes era de cinco años aproximadamente, pero se decidió cambiar para dar más estabilidad a los puestos. Pasado este plazo, los inspectores tienen que cambiar de central o prestar servicio en la sede del CSN en Madrid.

En total, a lo largo de estas cuatro décadas de funcionamiento, la Inspección ha estado formada por medio centenar de técnicos altamente cualificados. Uno de los ellos es el actual presidente del CSN, Juan Carlos Lentijo. En el acto de celebración de las cuatro décadas de funcionamiento del programa,



Central nuclear Vandellòs II

celebrado recientemente en el CSN, Lentijo señaló que esta unidad «es parte de la esencia de nuestra labor de supervisión y uno de los pilares que sustentan nuestra capacidad para actuar rápida y eficientemente frente a cualquier situación. Además, es un ejemplo de dedicación constante a la supervisión directa y permanente de las actividades nucleares en España».

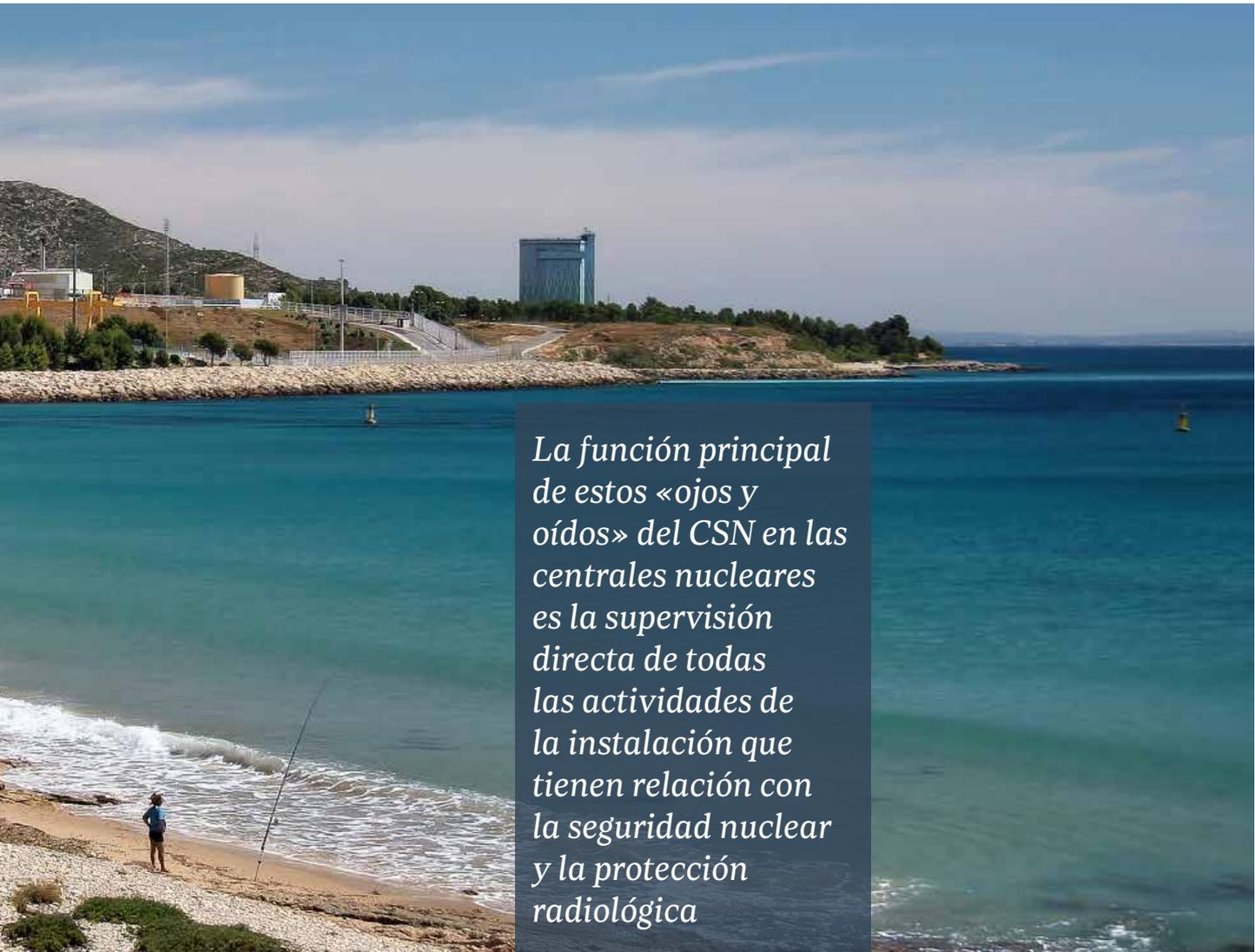
La función principal de estos «ojos y oídos» del CSN en las centrales nucleares es la supervisión directa de todas las actividades de la instalación que tienen relación con la seguridad nuclear y la protección radiológica, evaluar el cumplimiento de los requisitos de seguridad e informar al CSN sobre cualquier desviación o incidente. «Los inspectores supervisan e inspeccionan

todas las actividades con impacto en la seguridad, que tenemos obligación de supervisar o que están afectas a los procedimientos de supervisión. Además, también existe inspección desde el CSN, pero son ellos los que están en el día a día», explica Vázquez.

Los inspectores residentes tienen acceso a cualquier área de las plantas y su movimiento es completamente autónomo. Pueden entrar en cualquier parte cuando así lo consideren. Todos los días, cuando llegan a la central, acceden al programa de acciones correctoras, verifican qué condiciones anómalas han abierto, hacen un recorrido por planta, se reúnen asiduamente con el director de la central, tienen una serie de requisitos o procedimientos de vigilancia a ejecutar: al mes

o cada trimestre realizan una planificación de inspecciones que pueden ser de seguridad nuclear o de protección radiológica. «Después, trimestralmente, hacen un acta de inspección, valoran sus hallazgos, asisten a reuniones con el titular, por ejemplo, con los comités de seguridad del explotador, acuden a la sala de control, supervisan el estado de la central, comprueban qué alarmas hay... Es una labor de supervisión directa, diaria, de vigilancia continua», añade. Además, también llevan a cabo una labor relevante de comunicación pública y tiene un papel importante en actividades relacionadas con los planes provinciales de emergencia exterior.

La comunicación de los inspectores residentes con la sede del CSN



*La función principal de estos «ojos y oídos» del CSN en las centrales nucleares es la supervisión directa de todas las actividades de la instalación que tienen relación con la seguridad nuclear y la protección radiológica*

en Madrid es diaria y continua. Todas las mañanas hay una llamada del jefe de área de la Inspección Residente en la que participa el resto del grupo del CSN. En ella se comunica si ha habido cualquier tipo de incidencia o situación y, adicionalmente, si hay algún tema específico o de licenciamiento. También se comunican con la jefatura de proyecto presente en Madrid. «Además, cada trimestre, se reúnen todos los inspectores residentes en Madrid o en cualquiera de las instalaciones, con la asistencia de la subdirectora de centrales. En ocasiones yo también asisto, cuando hay algún tema específico que queremos tratar. Son reuniones de coordinación para homogeneizar la forma y el tratamiento de los distintos asuntos», desgrana Vázquez.

Puesto que están en las centrales y tienen una actividad diaria de supervisión, su formación es específica y generalista a la vez. «Cuando el inspector llega a una central nueva, primero se tiene que adaptar a ella y conocerla, porque no todas las centrales son iguales. Luego existe una segunda parte de formación en temas genéricos de supervisión, pero sin entrar en tanto detalle como los especialistas del CSN. Son más generalistas y especialistas en temas de operación de la central, cuestiones de supervisión, mantenimiento...», explica.

En el CSN, todas las áreas tienen una formación específica y otra común al personal que realiza labores de supervisión, relacionada con temas de inspección, protección

radiológica, etc. Para que los inspectores puedan operar de forma autónoma y moverse libremente por las instalaciones sin la supervisión del regulado, también reciben formación obligatoria sobre la propia instalación, relacionada con protección radiológica, emergencias, etc., que tienen que aprobar.

### **Los hallazgos**

El Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC) es una herramienta fundamental para los inspectores residentes. El CSN implementó este sistema en 2007, también basándose en el modelo estadounidense, para mejorar la supervisión de las centrales nucleares en España. El SISC se basa en un conjunto de indicadores de

*En la evolución del sistema se ha incorporado un programa de intercambio que permite a los inspectores acudir durante una semana a otra instalación, para comprobar in situ cómo hacen las cosas allí* //

funcionamiento de las centrales y de procedimientos de inspección que permiten una observación continua del comportamiento de la planta y la evaluación de los resultados de las inspecciones.

Cuando identifican un incumplimiento, que denominan «desviación», deben reflejarlo en el acta de inspección, y valorarlo desde el punto de vista del impacto en la seguridad o en la protección radiológica. «En nuestro sistema de supervisión, valoramos lo que encontramos y, en función del impacto que tenga, llevamos a cabo las actuaciones pertinentes», detalla Vázquez. En caso de detectar alguna desviación preocupante, el inspector debe contactar de forma inmediata con el CSN para su valoración.

Los hallazgos de los inspectores residentes se dirigen al SISC, donde se valoran todas las desviaciones y no solo las que provienen de su unidad. Los resultados de los indicadores se clasifican en cuatro niveles de importancia, atendiendo a la seguridad: muy baja (verde), de baja a moderada (blanco), sustancial (amarillo) y alta (rojo). El CSN publica los resultados de forma trimestral para cada una de las centrales en su página web.

### **Sistema muy sistemático y basado en resultados**

Vázquez destaca que lo fundamental, en estos cuarenta años de programa, es «que lo hemos hecho mucho más sistemático». Cualquier modelo implica dificultades al principio y se va mejorando con el tiempo. «Observamos mucho lo que hacen en Estados Unidos. En los años noventa, empezaron a implantar un sistema de supervisión y decidimos trasladarlo aquí. Es un sistema muy sistemático y basado en resultados, es decir, mantenemos una supervisión de base sobre la instalación que, en principio, si no pasa nada o solo se detectan cosas pequeñas, con poco impacto sobre la seguridad, no requiere acciones de refuerzo. Por el contrario, si se identifican cuestiones relevantes, es preciso intensificar el proceso de supervisión. En ese sen-



TERESA VÁZQUEZ

*Ahora estamos en el proceso de implantar las acciones de mejora identificadas. No todas están dirigidas a la inspección, pero algunas sí les afectarán para tratar de mejorar. Muchas van dirigidas a la caracterización de las desviaciones, a la homogenización de criterios...*

tido, la Inspección Residente es una parte clave del proceso de supervisión, porque cuentan con una serie de procedimientos muy sistemáticos y, además, pueden detectar cualquier incidencia con cierta rapidez, mucha más que si solamente estuvieran presentes cada quince días o una vez al año. En mi opinión, la Inspección Residente ha mejorado mucho su forma de hacer, también, porque entre



ellos intercambian experiencias. En este sentido, han sido muy importantes las reuniones trimestrales, sobre todo, de cara a homogeneizar sus actuaciones. Esto es clave: debemos ser previsibles y homogéneos, y actuar con un criterio equivalente para todas las instalaciones».

En la evolución del sistema se ha incorporado un programa de intercambio que permite a los inspectores acudir durante una semana a otra instalación, para comprobar *in situ* cómo hacen las cosas allí. «Eso también ayuda a mejorar y permite aportar en una instalación los conocimientos que se adquieren en otra diferente», valora Vázquez. Evidentemente, las cosas se afinan a medida que se ejecutan con intención de mejora, porque, tal como sentenció la directora técnica de Seguridad Nuclear del CSN, «todo es mejorable. Siempre». En este

sentido, relata que, en 2023, «hicimos un proceso de autoevaluación de la inspección en general, del sistema de supervisión de centrales, en el que participaron también inspectores residentes aportando sus valoraciones sobre temas diversos y se elaboró un plan de acción». Ahora están en el proceso de implantar las acciones de mejora identificadas. «No todas están dirigidas a la inspección, pero algunas sí les afectarán para tratar de mejorar. Muchas van dirigidas a la caracterización de las desviaciones, a la homogenización de criterios, etc.», afirma.

En definitiva, es un programa fundamental para el CSN. «Nos permite tener una supervisión muy directa y conocimiento al detalle de las cuestiones que están ocurriendo en las instalaciones. Eso, ya de por sí, es un hecho relevante que ayuda en la toma de decisiones diarias», concluye. ■

## «El calendario de cierre de las centrales es un reto para todo el sector, comenzando por el propio CSN y siguiendo por las empresas españolas»

■ Texto: Luis Tejedor | Fotos: Enresa

Desde su creación hace cuarenta años, la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa) se ha consolidado como referente en la gestión de materiales radiactivos. Entre sus logros más destacados, el presidente José Luis Navarro subraya las labores de desmantelamiento de la central nuclear Santa María de Garoña y la ejemplar eficiencia del centro de almacenamiento de El Cabril. Todo se enmarca en el contexto del séptimo Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), aprobado hace un año, pieza clave para garantizar el cierre ordenado de las cinco centrales nucleares operativas en España.

### **España ocupa una posición media dentro los países con industria nuclear. ¿Puede compararse con países del entorno en la gestión de residuos radiactivos?**

Más que comparar yo hablaría de equiparar. España se ha consolidado como un país con gran experiencia en la gestión de residuos radiactivos y desmantelamiento de centrales nucleares. Enresa se creó hace exactamente cuarenta años y, durante todo este tiempo, la compañía se ha situado como referencia a nivel internacional para agencias y empresas de nuestro ámbito de actividad en otros países. Por poner algunos ejemplos, tenemos en Córdoba el centro de almacenamiento de El Cabril, para residuos de muy baja, baja y media actividad, que es visitado anualmente por numerosos técnicos internacionales, y en

el ámbito del desmantelamiento, hemos desmantelado completamente la central nuclear José Cabrera, en Guadalajara, parcialmente Vandellós I, en Tarragona, y estamos acometiendo en estos momentos el desmantelamiento de la central nuclear Santa María de Garoña, en Burgos. Cada central de una tecnología diferente, lo que nos concede una experiencia, yo diría que única; y nos aporta unas lecciones aprendidas que son muy valiosas tanto para nosotros como para la comunidad internacional del sector. De hecho, nuestros técnicos son continuamente requeridos para compartir estos conocimientos en diversos foros. Hace poco, por ejemplo, hemos hecho una presentación sobre el desmantelamiento de José Cabrera en la Agencia de la Energía Nuclear (NEA) de París.

### **A finales de 2023, el Gobierno dio luz verde al séptimo Plan General de Residuos Radiactivos. ¿Qué líneas maestras o actualizaciones destacaría en este documento tan esperado?**

Era una obligación y una necesidad contar con el séptimo Plan General de Residuos Radiactivos que ha sustituido al sexto PGRR, aprobado en 2006, y que debería haber sido actualizado a partir de 2011, para adaptarse a la Directiva 2011/70/Euratom. El nuevo Plan marca la estrategia que debe seguir Enresa para el cumplimiento del servicio público esencial que tiene encomendado. En líneas generales, es un documento que está en consonancia con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2023 y con el calendario de cese ordenado de las centrales nucleares españolas, que fue acordado entre las empresas propietarias y



“  
Nuestros técnicos son continuamente requeridos para compartir estos conocimientos en diversos foros. Hace poco, por ejemplo, hemos hecho una presentación sobre el desmantelamiento de José Cabrera en la Agencia de la Energía Nuclear de París

Enresa en 2019. El séptimo PGRR establece medidas clave para gestionar los residuos nucleares en España. Incluye el inicio del desmantelamiento de las centrales nucleares tres años después de su cierre definitivo, excepto Vandellós I, cuyo desmantelamiento final será en 2030. Se mantendrán las operaciones en el centro de El Cabril para residuos de baja y media actividad, y se ampliará la capacidad de los Almacenes Temporales Individualizados (ATI). Además, se crearán siete Almacenes Temporales Descentralizados (ATD) en las centrales para gestionar combustible gastado y residuos de alta actividad.

El plan fija una hoja de ruta para disponer de un Almacén Geológico Profundo (AGP) en 2073, solución adoptada por otros países europeos, tras un proceso de participación pública que facilite la elección de su ubicación.

Es importante destacar también que este séptimo PGRR ha sido el primero de los siete realizados hasta la fecha que ha sido sometido a Evaluación Ambiental Estratégica e incluye una fase de consultas e información pública, lo que ha permitido una amplia participación, realizando aportaciones, por las partes interesadas. También ha sido el primer Plan que ha sido informado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y por las comunidades autónomas. El Pleno del Consejo concluyó que «las estrategias, actuaciones y soluciones técnicas presentadas son adecuadas desde el punto de vista de la seguridad nuclear y la protección radiológica».

**Con el actual escenario de cierre de centrales, ¿cómo afronta Enresa el reto que supone un calendario tan ajustado?**

Sin duda es un reto enorme, pero no solo para Enresa y sus profesionales. Yo diría que es un reto para todo el sector, comenzando por el propio CSN y siguiendo por las empresas españolas, algunas de ellas de primer nivel internacional, que necesariamente participarán en los desmantelamientos. Desde Enresa lo afrontamos como todos los retos a los que, en estos cuarenta años de trayectoria de la empresa, nos hemos enfrentado, con profesionalidad y siendo conscientes del servicio público que prestamos. El séptimo PGRR establece los recursos tanto económicos como humanos que serán necesarios, y así lo desarrollaremos.

### Teniendo en cuenta los focos de inestabilidad energética causados por los conflictos de Ucrania y Oriente Medio, ¿el cierre de las centrales, acordado en 2019, ha sido una decisión precipitada?

La misión de Enresa es cumplir con las funciones que tenemos encomendadas por la Ley sobre Energía Nuclear. No es nuestra competencia entrar en las decisiones sobre política energética. En cualquier caso, hay que recordar que el calendario de cierre fue, inicialmente, fruto de un acuerdo privado entre las empresas propietarias de las centrales, que surgió como una solución a las notorias discrepancias que había entre ellas en 2018, que llegaron a poner en riesgo la continuidad de la explotación de Almaraz a partir de 2020 y que, posteriormente, se plasmó en la firma de un protocolo de intenciones con Enresa. El hecho de haber podido disponer de un calendario en 2019 es muy positivo para Enresa, porque nos ha permitido planificar adecuadamente nuestras actividades, a diferencia de lo que sucedió con la central de Garoña. Y las empresas no nos han manifestado que tengan voluntad de modificar el acuerdo que alcanzaron entre ellas.

### Uno de los proyectos de desmantelamiento más mediáticos es el de Santa María de Garoña. El 19 de julio de 2023 se hizo efectiva la transferencia de titularidad a Enresa. ¿Se está cumpliendo con los objetivos establecidos para la Fase 1?

Efectivamente, el inicio del desmantelamiento de Garoña ha tenido bastante repercusión mediática. Posiblemente este interés sea consecuencia de la forma atípica en la que se produjo la parada de la central, que finalmente fue definitiva, en diciembre de 2012, por decisión de la empresa propietaria debido a motivos económicos, y en un marco de diferencias entre los socios y entre la empresa y el Gobierno de aquel momento.

El desmantelamiento de Garoña es uno de los proyectos más importantes que desarrolla Enresa en estos momentos. Es un proyecto planificado en dos fases. La primera, que fue informada favorablemente por



“  
No percibimos una preocupación social significativa sobre la seguridad de las instalaciones nucleares

el Consejo y en la que ya estamos inmersos, tiene como actividades más relevantes la evacuación del combustible gastado, que ahora se encuentra en la piscina de la propia central, al ATI. Además, el Edificio de Turbina se transformará en lo que denominamos el Edificio Auxiliar de Desmantelamiento, un espacio para acondicionar y gestionar residuos radiactivos. Son los dos principales trabajos de esta Fase 1 y, en ambos, estamos avanzando.

### Enresa, además, ha colaborado en 41 proyectos de once municipios en la zona de proximidad a Garoña. ¿Qué supone esta faceta de apoyo al desarrollo local?

Es fundamental para Enresa, en la medida de sus posibilidades y dentro de lo que nos marca la normativa vigente, mantener una implicación con las zonas en las que la empresa desarrolla sus actividades, no solo en el entorno de la central nuclear

Garroña. Y vuelvo de nuevo a lo que nos marca nuestra hoja de ruta, el Plan General de Residuos Radiactivos, en el que se deja muy claro que, entre nuestras líneas estratégicas de actuación, Enresa debe contribuir al desarrollo económico y social de los municipios de las zonas de influencia de las instalaciones nucleares y, en particular, de las que Enresa es titular. Somos conscientes del impacto positivo que genera nuestra actividad ordinaria y, adicionalmente, promovemos, en la medida en que podemos y la legislación nos permite, colaboración para proyectos de desarrollo local, fundamentalmente generadores de empleo.

**El Cabril, que recibió más de 2600 m<sup>3</sup> de residuos radiactivos el año pasado, resulta un referente internacional de centros de almacenamiento de materiales de baja y media actividad. ¿Qué hace de esta instalación un ejemplo para otras similares?**

Es cierto que El Cabril es un referente internacional. A lo largo del año recibimos visitas de distintos países interesados en conocer el sistema de gestión que hemos desarrollado en España. Creo que esto responde a varias razones: la primera es que, cuando El Cabril se diseñó, se hizo teniendo en cuenta la experiencia internacional que había hasta entonces y se dio un paso más en seguridad y recuperabilidad de los residuos. Además, la instalación convive a la perfección con un entorno natural imponente, demostrando cómo la actividad de un centro de almacenamiento de este tipo no afecta al medio natural que le rodea. También hay que tener en cuenta –eso es muy apreciado por otros países– que, en el modelo español de gestión de residuos radiactivos y desmantelamiento de centrales nucleares, es la misma empresa, Enresa, la que se encarga de su ejecución y posterior gestión, en el caso de los residuos radiactivos de muy baja, baja y media actividad, en El Cabril, lo cual es muy eficiente. Y no quiero olvidarme de la adaptación tecnológica que la instalación ha experimentado en sus treinta años de actividad, así como la profesionalidad de sus

trabajadores, que son señas de identidad de El Cabril.

**Ha mostrado su confianza total en la seguridad de las centrales, entre otras razones, por la elevadísima profesionalidad de sus trabajadores. ¿Cree que la sociedad también tiene esta confianza?**

La transparencia y la comunicación son las mejores herramientas para generar confianza. En Enresa así lo hacemos desde hace cuarenta años. Que la población esté informada con todo detalle de nuestras actividades es fundamental para poder desarrollarlas. Para mejorar la percepción pública hay que seguir trabajando con la máxima transparencia, adaptándose a las nuevas formas de información y participación. En este punto, es fundamental la tranquilidad que nos da a todos la existencia del CSN y el rigor con el que sus profesionales desempeñan sus funciones. Desde Enresa no percibimos que exista una preocupación social significativa sobre la seguridad de las instalaciones nucleares, pero, desgraciadamente, se da la paradoja o podríamos decir el problema, compartido con todos los países, de que hay personas e instituciones que se declaran favorables a la energía nuclear al tiempo que rechazan que se almacenen los residuos en su entorno. Entonces, ¿qué hacemos con los residuos? Por eso no podemos hablar sobre la energía nuclear sin incluir una solución aceptada para la gestión, temporal y definitiva, de los residuos radiactivos.

**La comunicación y la transparencia han sido siempre una constante en las actuaciones de Enresa. ¿De qué manera han puesto a la práctica estas premisas?**

Efectivamente, y no es porque lo diga yo. Es que es una obligación que emana del propio Plan General de Residuos Radiactivos que señala que «las características de las actividades de Enresa hacen necesaria [...] una fuerte imbricación social, con apertura y transparencia y un empeño notable en comunicación hacia la sociedad en general y las zonas donde desarrolla sus

actividades en particular, que permitan percibir claramente cuál es la función y cuáles son las garantías que ofrece su gestión».

Por ello, abrimos las puertas de nuestras instalaciones a diferentes colectivos, tales como periodistas, políticos, asociaciones, empresas, estudiantes, etc. ¿Qué mejor manera de explicar lo que hacemos que invitando a verlo? Además, contamos con soportes como nuestras revistas corporativas, la web oficial, perfiles en redes sociales, participamos en foros y encuentros del sector y organizamos eventos propios que nos permitan llegar a diferentes públicos. Creo que ser transparentes hace que seamos confiables. Y así debemos seguir.

**¿Cómo valora la colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y Enresa?**

Con el organismo regulador español en materia nuclear mantenemos una relación profesional, que yo definiría como respetuosa y leal, como debe ser. La interlocución es fluida y contamos, entre otras vías, con las reuniones del comité de enlace entre las dos entidades para trabajar con plena coordinación.

**¿Cuáles serán los desafíos más importantes que deberán afrontar en los próximos años?**

Junto a la continuación del desmantelamiento de Garroña, tenemos a la vista la construcción de la nueva plataforma sureste para residuos de baja y media actividad de El Cabril. También estamos dando pasos importantes en la gestión del combustible gastado, ampliando la capacidad de los almacenes temporales de las centrales nucleares. Además, como hemos comentado anteriormente, tenemos que acometer a medio plazo el desmantelamiento de las centrales nucleares, así como dar los pasos necesarios para que la instalación definitiva para el combustible gastado y los residuos de alta actividad, el almacenamiento geológico profundo, sea una realidad. Son desafíos de una gran envergadura, pero estoy convencido de que en Enresa y en el sector estamos preparados y capacitados para ello. ■

# PROYECTO GO-MERES DE CSN/UPM SOBRE SIMULACIÓN CON GOTHIC DEL COMPORTAMIENTO EN CONTENCIÓN DEL HIDRÓGENO CON ROCIADORES Y PISCINAS DE SUPRESIÓN

## Autores

Juan Manuel Martín-Valdepeñas Yagüe<sup>1</sup>, Gonzalo Jiménez Varas<sup>2</sup>, Carlos Vázquez Rodríguez<sup>3</sup>

Técnico del Área de Análisis Probabilista de Seguridad, coordinador del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en el proyecto  
Profesor contratado doctor, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), investigador principal del proyecto en la UPM  
Investigador en Forschungszentrum Jülich (Alemania), investigador principal contratado del proyecto en la UPM

Los accidentes de Three Mile Island 2 (Estados Unidos) y Fukushima Daiichi (Japón) han demostrado la posibilidad de que se produzcan combustiones de hidrógeno en la contención y en otros edificios de las centrales nucleares durante accidentes con daño masivo al combustible.

**P**ara determinar el riesgo de combustión en estos eventos es necesario conocer con precisión la distribución de los gases que se liberan durante el accidente. Por otra parte, en el accidente de Fukushima Daiichi se produjeron incrementos de la presión del pozo seco por encima de lo esperado, apuntando a la posibilidad de fenomenologías de estratificación térmica del agua en las piscinas de supresión.

El CSN participa activamente en proyectos de investigación de la OECD/NEA sobre estos fenómenos en instalaciones experimentales como PANDA y THAI. Como complemento a estos proyectos, el CSN ha suscrito con la UPM el convenio de colaboración proyecto GO-MERES.

En este proyecto se simulan con el código GOTHIC de contención con capacidad 3D experimentos de los proyectos de la OECD/NEA en la instalación PANDA del Paul Scherrer Institute (Suiza). Con la experiencia de estas simulaciones se llevan a cabo aplicaciones a planta de situaciones similares a las analizadas experimentalmente. Para ello se ha construido un modelo detallado 3D de una contención seca PWR de diseño Westinghouse de tres lazos, representativo de centrales nucleares españolas. Con este modelo se ha simulado la fenomenología del hidrógeno con actuación de rociadores en situaciones de accidente severo. También se ha estudiado la estratificación terminal en la pisci-

na de supresión de una contención Mark I de un reactor tipo BWR.

## Antecedentes y aplicabilidad

El diseño y licenciamiento de las centrales nucleares se basan en la capacidad de soportar un conjunto de accidentes postulados denominados Accidentes Base de Diseño (DBA por sus siglas en inglés, *Design Basis Accident*), lo que proporciona la garantía básica de seguridad de la instalación. Sin embargo, los accidentes de la unidad 2 de la central nuclear Three Mile Island ocurrido en EE. UU. (1979) y las unidades 1, 2 y 3 de la central nuclear Fukushima Daiichi en Japón (2011) han demostrado que son posibles accidentes más allá de los DBA de las centrales. Estos accidentes se denominan ac-



Central nuclear Three Mile Island

cidentes severos y en ellos se puede producir la fusión parcial o total del núcleo y verse amenazada la integridad de la contención.

Un accidente severo se desencadena ante la pérdida de la capacidad de refrigeración del reactor, provocando un aumento de la temperatura del núcleo que daña los elementos combustibles hasta llegar a causar daño suficiente para poner en peligro su integridad, incluso produciendo su fusión parcial o total. En este proceso de degradación del combustible, el material metálico de las varillas, principalmente el zirconio, reacciona con el vapor de agua generando hidrógeno. Este gas combustible junto con el vapor generado durante el accidente se distribuye en la atmósfera de la contención de forma no uniforme, mezclándose con el aire de la contención y pudiendo alcanzar nubes de gas en condiciones inflamables para concentraciones bajas de hidrógeno o explosivas si las concentraciones son más altas. En el transcurso de los accidentes de Three Mile Island y Fukushima Daiichi se produjeron explosiones de hidrógeno.

La presencia de dichos gases combustibles puede suponer una complicación adicional a la hora de aplicar las estrategias de gestión del accidente con los sistemas de enfriamiento de la contención como los rociadores o enfriadores.

Estos fenómenos afectan al comportamiento de la atmósfera de la contención, cuyo conocimiento es necesario para diversas tareas que se realizan en el CSN. Los resultados del proyecto GO-MERES son de utilidad para el conocimiento del comportamiento de los recombinadores autocatalíticos pasivos (PAR, por sus siglas en inglés *Passive Autocatalytic Recombiners*) en las centrales nucleares españolas y su interacción con los sistemas de contención.

Adicionalmente, en el accidente de Fukushima Daiichi, la presión observada en el pozo seco estuvo por encima de lo esperado. Una explicación plausible de este comportamiento es que se produjera estratificación térmica del agua en las piscinas de supresión. Estos fenómenos también se han estudiado en el proyecto GO-MERES.

Los resultados del proyecto son de aplicación directa para los estudios del comportamiento de la contención durante los accidentes severos en los Análisis Probabilistas de Seguridad de nivel 2.

### Fenomenología y códigos de cálculo

En el proyecto GO-MERES se ha investigado el comportamiento de los gases en la atmósfera de la contención, por una parte, y el movimiento del agua en las piscinas de supresión, por la otra. Tanto la distribución del hidrógeno, vapor y aire en la contención como la distribución de temperaturas en el agua en las piscinas, de forma homogénea o no homogénea (estratificada), durante el transcurso de un accidente severo, pueden llevar a que la presión final sobre la estructura de la contención sea muy diferente y, por lo tanto, que la integridad de la contención pueda verse amenazada o no.

La liberación de gases combustibles en la atmósfera de la contención durante un accidente severo se produce en forma de chorros o plumas que pueden acumularse, estratificarse o mezclarse en la propia

contención. Además, procesos como la convección, la condensación sobre las paredes de la contención o la interacción con los sistemas de la contención como rociadores, enfriadores o PAR pueden afectar a esta distribución de gases en la contención.

De forma similar, en las piscinas de supresión se produce la liberación de vapor a través de toberas o difusores (*spargers*). Estos procesos pueden hacer que el mezclado de la piscina sea total (homogéneo) o parcial (estratificada), reduciéndose en el segundo caso la capacidad de extracción de calor de la atmósfera de la contención a través de las piscinas y aumentando la presión esperada durante el accidente severo.

Para la modelación de la contención durante estos accidentes se utilizan códigos de cálculo, que permiten predecir el comportamiento de la contención durante los accidentes severos. Se distinguen tres familias de códigos. Por un lado, están los códigos de sistema o/y parámetros agrupados (LP por sus siglas en inglés *Lumped Parameters*). Estos códigos resuelven ecuaciones muy simplificadas para el comportamiento del fluido, promediándolas en volúmenes muy grandes. Para la transmisión de calor y masa con las estructuras y sistemas de la contención utilizan correlaciones ex-



perimentales o ecuaciones mecanicistas también promediadas. Esta aproximación permite representar contenciones con decenas de nodos y, por lo tanto, simular transitorios completos de accidente severos en tiempos de cálculo pequeños.

Por otro lado, están los códigos de fluido-dinámica computacional (CFD, por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*). Estos códigos resuelven las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos en volúmenes pequeños, necesitando ecuaciones de cierre adicionales para la turbulencia. Para la transmisión de calor y masa necesitan resolver las capas límites

con las estructuras y las interfases con líquidos y gotas. Estos códigos necesitan del orden de millones de nodos para aplicaciones a planta y, por lo tanto, la simulación de transitorios completos de accidente severo es muy costosa y compleja.

Una aproximación intermedia, que es la que se ha utilizado en el proyecto GO-MERES, son los códigos tridimensionales o simplemente 3D. Estos códigos también resuelven las ecuaciones de la dinámica de fluidos en 3D, con ecuaciones de la turbulencia, como el caso de los CFD.

Sin embargo, para la transmisión de calor y masa utilizan correlaciones o ecuaciones mecanicistas



promediadas, como el caso de los códigos LP. De esta forma, esta aproximación no necesita resolver las capas límite o interfaces, por lo que el número de nodos se reduce drásticamente respecto de los CFD. Por ejemplo, con el código GOTHIC utilizado en el proyecto GO-MERES se han realizado aplicaciones a planta con 70.000 nodos y transitorios de nueve horas en cuatro a cinco días de cálculo. GOTHIC es un código multifase y multiespecie que permite la simulación de volúmenes de control en la aproximación LP con 3D en el mismo modelo, contando también con capacidades de simulación de sistemas de seguridad (rociadores, PAR, bombas, intercambiadores de calor, etc.).

El mayor problema de los códigos LP es su dificultad para identificar situaciones no homogéneas o estratificaciones, frente a la mayor capacidad de los códigos CFD y 3D para esta fenomenología. Por otra parte, la enorme versatilidad y rapidez computacional de los códigos LP los hacen indispensables para la evaluación de grandes cantidades de casos de accidente severo. Por ello, una estrategia de simulación con varios tipos de códigos puede ser quizá lo más recomendable para evaluar de forma completa y con la precisión que requieren fenómenos como la distribución de gases combustibles y la estratificación térmica en piscinas de supresión.

Independientemente, todos los códigos necesitan la comparación frente a experimentos para poder conocer su capacidad para reproducir ciertos fenómenos, el rango de incertidumbre de los cálculos, calibrar las estrategias de simulación y entrenar a los usuarios. Con respecto a los códigos utilizados en los APS Nivel 2, la GS-1.10 del CSN incluye entre las tareas de evaluación en las Revisiones Periódicas de Seguridad comprobar el estado y validación de los métodos analíticos y códigos de cálculo usados en los APS. Por otro lado, la Guía Reguladora 1.200 de la NRC incluye entre las características técnicas del APS Nivel 2 el conocimiento de las limitaciones de los códigos que se utilizan en los análisis de progresión de accidente de los APS Nivel 2.

**Entidades de investigación**

El proyecto de investigación se ha realizado en la modalidad de convenio de colaboración entre el CSN y la UPM. El CSN ha coordinado el proyecto y ha aportado la experiencia y los datos experimentales en la instalación PANDA, obtenidos a través de los proyectos de la OECD/NEA HYMERES fase 1 y 2 en los que el CSN participa; también ha aportado información para que las aplicaciones a planta sean representativas de centrales nucleares españolas, si bien, los estudios realizados son genéricos y no representan a una central nuclear concreta. La

UPM ha realizado todas las tareas de construcción de geometrías, modelado y cálculos con el código GOTHIC, mejoras en el código, el análisis de resultados y la comparación con los experimentos. Adicionalmente, la UPM ha aportado la información sobre las secuencias, ha realizado los escalados y el resto de tareas analíticas. Finalmente, la UPM ha participado y asesorado al CSN en reuniones de la OECD/NEA con respecto a estos experimentos.

**Metodología del proyecto**

La metodología del proyecto ha consistido en la simulación con el código GOTHIC de experimentos de contención en la instalación PANDA y la utilización de las lecciones aprendidas de estas validaciones para realizar aplicaciones a planta en contenciones genéricas pero representativas de centrarles nucleares españolas en condiciones accidentales de interés para el CSN.

Esta metodología no siempre es la utilizada en las aplicaciones a planta o incluso en la definición de los experimentos, lo que aumenta las incertidumbres y validez de los resultados de los códigos. Adicionalmente, el proyecto ha servido como nexo de unión entre los experimentos y las aplicaciones a planta, influyendo en la definición de algunos de los experimentos de los proyectos de la OECD/NEA en la instalación PANDA.

**Tabla 1. Planificación temporal final de las actividades realizadas en el proyecto GO-MERES**

Fases	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Piscina Supresión	Cálculos de alcance H2P4			
		<b>Experimento:</b> HYMERES HP5 <b>Análisis planta:</b> Supression Pool Mark I		
Rociadores		Cálculos de alcance H2P5		
		<b>Experimento:</b> ERCOSAM PE1 series <b>Análisis planta:</b> ERCOSAM SBLOCA	<b>Experimento:</b> HYMERES-2 H2P5 <b>Análisis planta:</b> PWR-W spray implementation	<b>Experimento:</b> SETH-2ST3 series <b>Análisis planta:</b> AMHYCO sequence

La planificación temporal y tareas realizadas durante el proyecto se muestran en la tabla 1. En las siguientes secciones se describirán estos experimentos y las aplicaciones a planta.

### Experimentos de distribución de gases y rociadores

El primer experimento de distribución de gases con rociadores simulado en el proyecto GO-MERES ha sido el experimento PE1, realizado en la instalación PANDA en el marco del proyecto de la Unión Europea ERCOSAM. Para la realización de este experimento se utilizaron las dos vasijas superiores de PANDA y en él se impuso un perfil de liberación de helio (simulando hidrógeno) y vapor escalado de un LOCA (Accidente con Pérdida de Refrigerante, por sus siglas en inglés *Loss Of Coolant Accident*) pequeño que maximizaba la liberación de hidrógeno. El experimento presentaba un perfil completo de accidente con cinco fases entre las que se encontraban inyección de vapor, inyección de He y actuación de rociadores, que disponían únicamente de una tobera.

El segundo grupo de experimentos realizados fueron los experimentos H2P5\_1 y H2P5\_2 del proyecto HYMERES fase 2 de la NEA/OECD. Estos experimentos se realizaron escogiendo una de las vasijas superiores de PANDA. En el experimento H2P5\_1 se utilizó un anillo de ocho toberas y una central, para representar los rociadores. En el experimento H2P5\_2 se utilizó una única tobera en la posición central.

### INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PANDA

La instalación experimental PANDA del PSI está formada por cuatro vasijas conectadas formando una estructura de 25 m de altura y 414 m<sup>3</sup> de volumen (ver figura 1). Las dos vasijas superiores son de 90 m<sup>3</sup> y en ellas se han realizado experimentos de distribución de gases. Las dos vasijas inferiores, de 117 m<sup>3</sup> cada una, se utilizan generalmente para los experimentos de piscina de supresión.

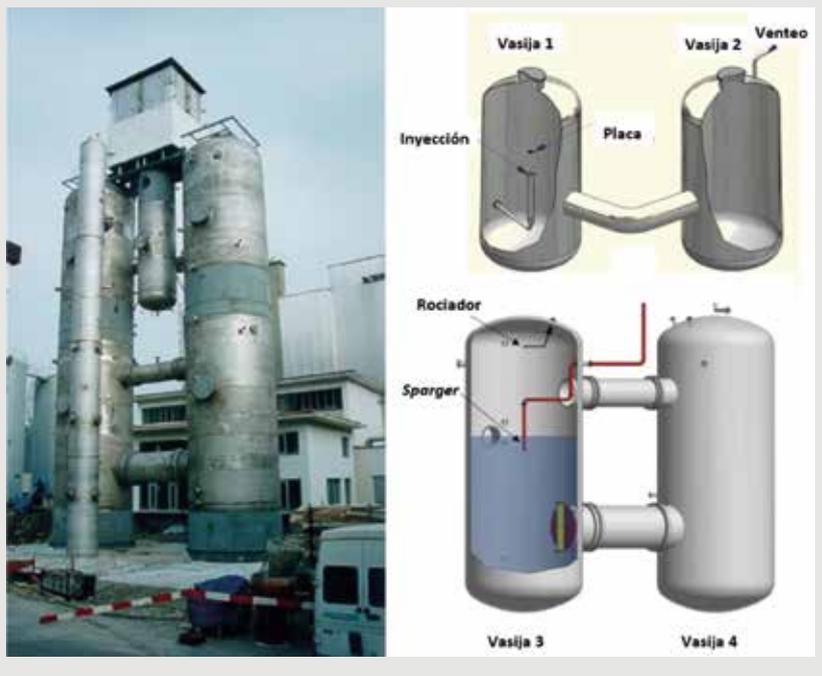


Figura 1. Instalación experimental PANDA. Fuente: PSI

Sin embargo, el caudal total de agua por los rociadores en ambos experimentos fue el mismo. Para estos experimentos, la UPM colaboró con el PSI en la realización de cálculos de alcance (pre-test) y el CSN junto con la UPM participó en el diseño de las condiciones del mismo.

Por último, se realizó una tercera serie de experimentos, en este caso, los experimentos ST3\_1, ST3\_2 y ST3\_3 del proyecto SETH-2 de la NEA/OECD. En estos experimentos se utilizaron las dos vasijas superiores de PANDA y en ellos los rociadores tenían únicamente una

Tabla 2. Condiciones de los experimentos simulados

Experimento	Presión (bar)	Temperatura Paredes (°C)	Capa estratificada	Nº Toberas	Concentración gas
ST3_1	~2 a 3	~130	Alta	1	Diversas combinaciones de vapor/ He/aire en la capa estratificada y la inferior
ST3_2					
ST3_3					
PE1	~110	Media	9		
H2P5_2					
H2P5_1					

tobera. La diferencia más importante de estos experimentos con los de la serie H2P5 fue que la presión y temperatura de la atmósfera eran mayores.

En todas las series experimentales se partió de una situación con la atmósfera estratificada en He al inicio de la fase de los rociadores. Esta situación se conseguía mediante la liberación de He en la fase anterior por un punto intermedio o alto de vasija 1 de PANDA, las condiciones aproximadas se muestran en la tabla 2.

Los resultados obtenidos en las simulaciones con GOTHIC muestran, en general, una despresurización más rápida que en los experimentos. Para mejorar los resultados se hicieron varios casos de sensibilidad a la malla, la transmisión de calor al sumidero y paredes, el diámetro del anillo, posición y número de toberas. Ninguno de estos parámetros mejoró significativamente los resultados de presión, debido a que la condensación de vapor compensaba cualquier incremento de la evaporación.

Sin embargo, una reducción del 25 % del flujo de gotas en los rociadores mostró una mejora de los resultados de presión bastante significativa. Este resultado se observó en la simulación de todos los experimentos. En la figura 2 se muestra como ejemplo la serie H2P5.

Adicionalmente, se han comparado otras variables de las simulaciones de GOTHIC con los experimentos, como la temperatura de las paredes, concentración de He a distintas alturas, etc., obteniendo en general buenos resultados. Concluyendo que GOTHIC permite simular escenarios con la complejidad de los test de forma fiable.

La conclusión más relevante de estos análisis para utilizarlas en las aplicaciones a planta es que se pueden obtener resultados adecuados con un número de celdas del orden de 40.000. Además se recomienda, por las desviaciones observadas, hacer estudios de sensibilidad a los parámetros de los rociadores (caudales, tamaño de gotas, temperatura del agua) antes de establecer

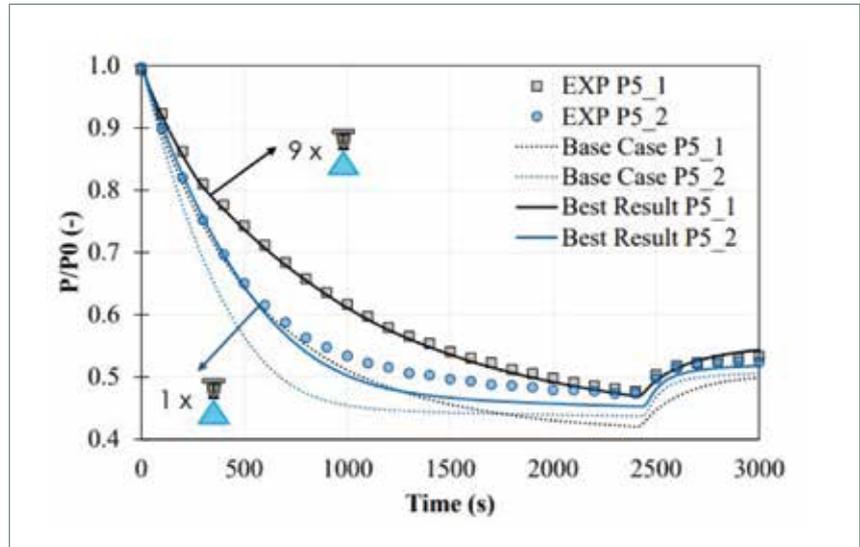


Figura 2. Evolución de la presión en el estudio paramétrico con GOTHIC de los experimentos de la serie H2P5. Nota: Best results son los casos con el 75 % del caudal real por los rociadores

las conclusiones de seguridad. En especial, por la posible sobrestimación de la condensación de vapor en las gotas del rociador, la dificultad para evaluar la evaporación del agua en las paredes metálicas del liner durante la actuación del rociado, la necesidad de modelar cada una de las toberas de los rociadores y la sensibilidad del mezclado del gas al tamaño de gotas.

**Aplicaciones a planta de distribución de gas y rociadores**

Para la realización de las aplicaciones a planta, la UPM construyó con GOTHIC una geometría 3D de una

contención seca genérica PWR de tres lazos de diseño Westinghouse, representativa de una central nuclear española. Para ello, el grupo de investigación de la UPM desarrolló una metodología completa de modelación en diversos proyectos de investigación y tesis doctorales. La metodología consiste (figura 3) en construir con AUTOCAD, a partir de los planos de planta, una geometría detallada en 3D y, a continuación, simplificar manualmente en el CAD dicha geometría para adaptarse a las características del mallado de GOTHIC. Posteriormente se implementa la malla y la geometría

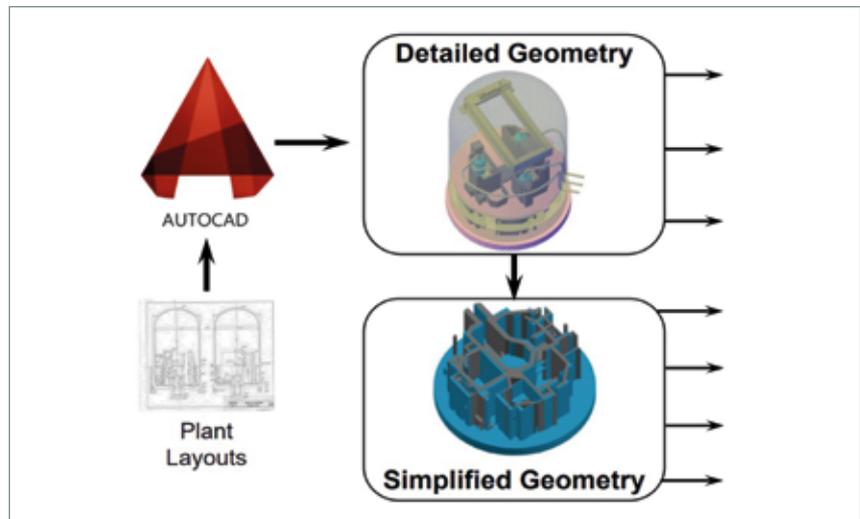


Figura 3. Metodología de construcción de la contención seca genérica PWR-W construida por la UPM

en GOTHIC por medio de una aplicación automática desarrollada por la UPM en Python. Este proceso ha sido optimizado por medio de lo que la UPM denomina preventive methodology, que consiste en identificar partes de la geometría que pueden dar problemas en el cálculo de GOTHIC debido a la forma de la malla si se generasen directamente. Con la metodología desarrollada, este tipo de efectos geométricos se simplifica antes de iniciar las simulaciones, pero sin perder la representatividad del modelo. Esto ha permitido que los tiempos de cálculo de estas mallas optimizadas sean muy competitivos, al eliminar las celdas más problemáticas.

En el modelo final de contención seca PWR genérica (PWR-W) se han implementado los anillos de los rociadores, con sus toberas, y los PAR, en ambos casos siguiendo una configuración genérica.

A continuación, se ha realizado una aplicación a planta para cada uno de los análisis con GOTHIC de los experimentos, siguiendo el esquema indicado en la tabla 1.

En primer lugar, tras la modelación del experimento PE1 de EU-ERCO-SAM, se utilizó la misma metodología de escalado del proyecto para definir una secuencia de SBLOCA que maximizara la generación de hidrógeno, escalándola desde la secuencia del experimento a la contención genérica estudiada. En esta primera aplicación a planta se comprobó la actuación de los rociadores en diferentes momentos del transitorio y se comparó con el escenario sin actuación de los mismos. También se analizó el efecto sobre la caída de la presión de la temperatura de las gotas de los rociadores entre 30 °C y 80 °C. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad a la localización de la rotura, en el caso base se localizaba en la rama fría (parte baja de la contención) y en el nuevo caso la rotura se situaba en la cabeza del presionador (que está en la parte intermedia de la contención). Esta situación de la rotura en un punto intermedio es más parecida a la estudiada en el experimento EU-ERCO-SAM y, aunque es un escenario

menos probable que en el punto bajo, podría ser más propicio a la estratificación y, por lo tanto, ser envolvente del riesgo y de interés para el APS Nivel 2. La comparación de los resultados de estos dos casos se muestra en la figura 4 («BC» con la rotura a la altura de las ramas y «Break PZR» con la rotura en la cabeza del presionador). En la parte de arriba de la figura,

la rotura está situada en un punto bajo y la concentración de hidrógeno es bastante homogénea. Por el contrario, en la parte baja de la figura, la rotura se sitúa en un punto más alto y la concentración de hidrógeno está estratificada, siendo ligeramente superior la concentración en el caso estratificado respecto del caso homogéneo (línea gris de la figura 5). En caso de

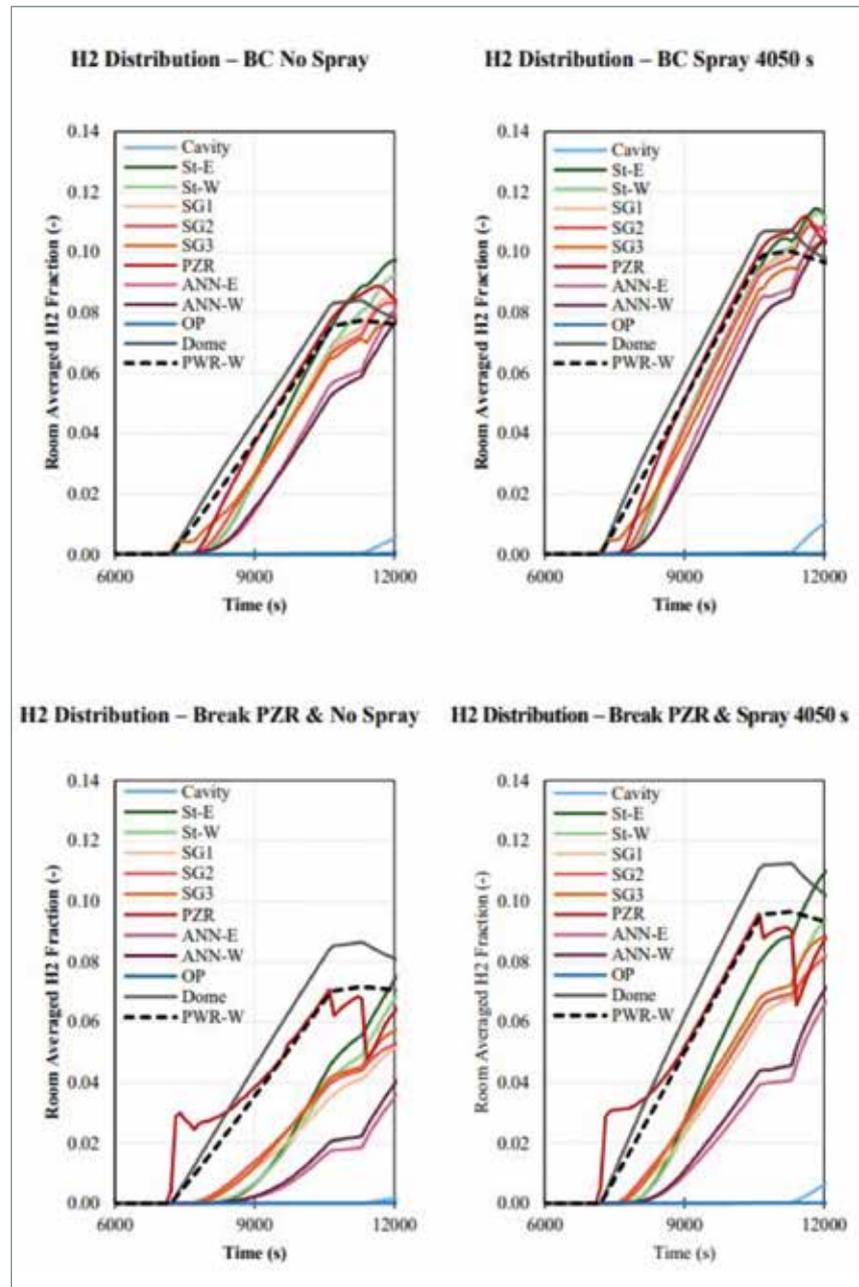


Figura 4. Resultados de concentración de hidrógeno con GOTHIC en distintas zonas de una contención genérica PWR-W durante el LOCA pequeño estudiado (arriba punto liberación bajo, izquierda sin rociadores, abajo punto de liberación más alto, derecha con rociadores)

actuación de los rociadores durante el transitorio estudiado, la estratificación se mantiene y el efecto de la condensación del vapor hace que las condiciones del hidrógeno sean más críticas en ambos casos, homogéneo y estratificado (ver parte derecha de la figura 4).

En segundo lugar, tras la modelación de los experimentos de la serie H2P5 de OECD/NEA-HYMERES-2 se realizó una aplicación a planta académica que intentaba reproducir las condiciones del experimento a una escala semejante a la de planta. La principal motivación de este análisis estaba en que al pasar de un volumen libre de PANDA en la serie H2P5 de 90 m<sup>3</sup> a un volumen de planta de aproximadamente 60 000 m<sup>3</sup>, las escalas de los fenómenos eran muy diferentes. Por lo tanto, si se mantuviera el mismo tamaño de malla que el utilizado en los experimentos se necesitarían treinta millones de nodos, lo que haría el problema inabordable.

Con este objetivo se ideó una geometría (PWR-PANDA) de un volumen semejante a una contención real, pero vacía en su interior (ver figura 5). Esta geometría, inicial-

mente, se construyó con la misma relación que PANDA para los parámetros más importantes de escalado (superficie liner, masa liner y c de rociado respecto del volumen libre). Posteriormente, se fue cambiando cada parámetro y analizando los resultados hasta aproximarse a los de la contención genérica.

Como resultado de este análisis se concluyó que los procesos de cambio de fase estaban más dominados por las diferencias en los parámetros de escalado que en la malla utilizada y que la habilidad de mezclado de los rociadores no se veía afectada por el tamaño de malla. Adicionalmente, los tiempos de mezclado por los rociadores en la contención genérica (PWR-W) eran hasta cuatro veces más lentos que los equivalentes de los experimentos, por el efecto de las estructuras internas de la contención frente a la situación totalmente vacía del modelo PANDA-PWR. Como resultado final se identificaron dos mallas adecuadas para los subsiguientes análisis de planta (17 600 nodos y 70 400 nodos).

En tercer lugar, tras la modelación de los experimentos del proyecto

OECD/NEA-SETH-2, se realizó la aplicación a planta final del proyecto, donde se aplicó toda la experiencia ganada en el mismo. Para este estudio se seleccionó una secuencia de SBO (pérdida total de corriente eléctrica, por sus siglas en inglés *Station Black Out*) que maximizara la generación de hidrógeno y con diferentes ventanas de recuperación de los rociadores en el modelo de contención genérica PWR-W.

Los resultados obtenidos en los análisis, sin considerar PAR, muestran que con la actuación de los rociadores pueden aparecer bolsas de hidrógeno en condiciones explosivas al final del transitorio (entre 300 kg y 800 kg). Estas nubes pueden ser limitadas y localizadas en la parte baja de la contención si la activación de los rociadores es temprana (figura 6 izquierda). Si esta activación es más tardía, el efecto puede ser generalizado en toda la contención (figura 6 derecha). En cualquier caso, el efecto de reducción de la presión de la contención es similar en ambos casos.

Sin embargo, en el caso de considerar los PAR en el análisis, se sigui-

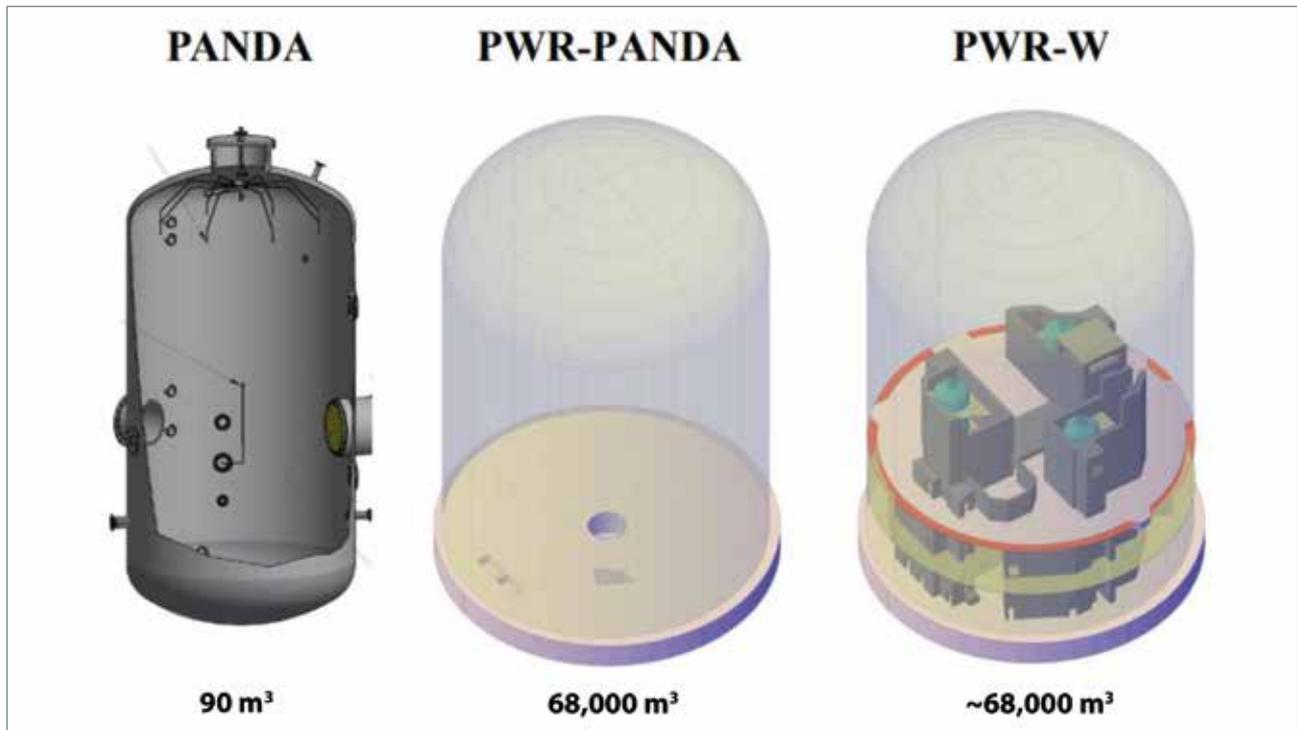
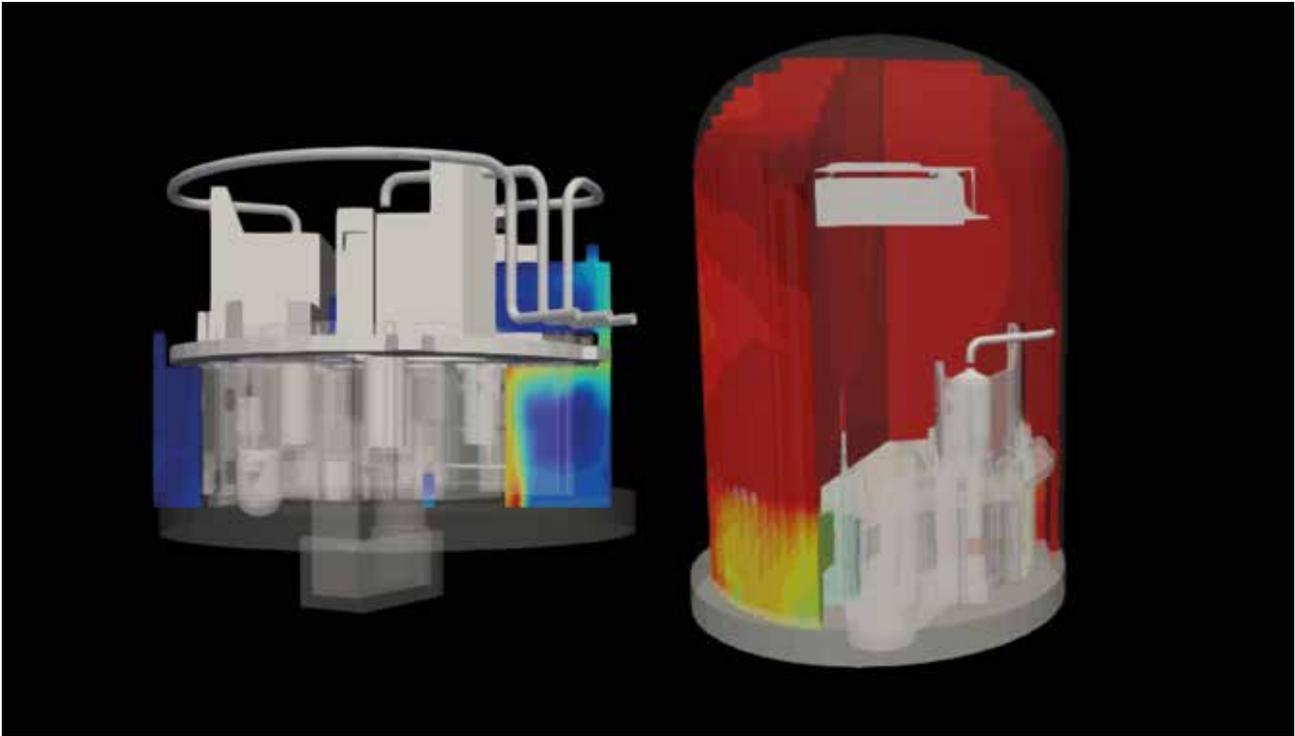


Figura 5. Geometría de los tres modelos usado en el análisis



**Figura 6.** Resultados con GOTHIC de un SBO con recuperación temprana (izquierda) y tardía (derecha) de los rociadores. Las zonas coloreadas en ambas figuras marcan condiciones explosivas de hidrógeno en distintas zonas de la contención

rán formando mezclas inflamables de hidrógeno, pero en estos casos la cantidad de hidrógeno en condiciones explosivas es despreciable (masas de hidrógeno por debajo de 1 kg en la zona de la rotura), independientemente del tiempo de activación de los rociadores. Por otra parte, la cantidad de hidrógeno en condiciones inflamables será muy dependiente del momento de recuperación de los rociadores. Si esta recuperación se produce relativamente coincidente con el pico de máxima liberación no habrá dado tiempo a que los PAR recombinen suficiente hidrógeno durante el periodo con la atmósfera inertizada y, por lo tanto, la masa de hidrógeno en condiciones inflamables una vez que actúen los rociadores será más alta. En caso de que actúen los rociadores más tarde, la desinertización se produce cuando los PAR han tenido tiempo para reducir apreciablemente la cantidad de hidrógeno de la contención y, por lo tanto, la cantidad de hidrógeno inflamable será menor y durante menos tiempo.

Adicionalmente, en este estudio se realizaron análisis de sensibilidad, reduciendo la tasa de recombinación y aumentando la conductividad de las paredes de hormigón. Los resultados de estos casos no cambian las conclusiones anteriores.

La otra fenomenología de contención estudiada en el proyecto ha sido la posibilidad de estratificación térmica en piscinas de supresión. Para el estudio de este fenómeno se hicieron también análisis con GOTHIC, utilizando la misma metodología que en el resto del proyecto: simulación y validación de la serie experimental HP5 del proyecto OECD/NEA-HYMERES y ampliación a planta por medio del análisis de la piscina de supresión de una contención BWR Mark I. En esta tarea también se hicieron cálculos de alcance (pre-test) de la serie experimental H2P4 del proyecto OECD/NEA-HYMERES-2.

#### **Sinergias y líneas futuras**

El proyecto GO-MERES ha significado un punto de encuentro entre varios proyectos y actividades de

I+D de la UPM y el CSN. En primer lugar, con los proyectos experimentales de la OECD/NEA en los que participa el CSN (HYMERES fases 1 y 2, PANDA). En segundo lugar, con otros proyectos de la instalación PANDA (EU-ERCOSAM y OECD-SETH-2) y con el proyecto de intercambio de investigadores OECD-NEST, proyectos en los que no había participado el CSN. En tercer lugar, con el proyecto de la Unión Europea AMHYCO (acuerdo de subvención 945057), que coordina la UPM.

Como líneas futuras de investigación, actualmente está vigente la segunda fase del proyecto (GO-MERES-2), en la que siguiendo la misma metodología se realizarán experimentos de interés de los proyectos OECD/NEA-PANDA y OECD/NEA-THEMIS relacionados con hidrógeno y CO en contención.

Cabe destacar también el proyecto INTERCON-3D de investigación con el CSN en la modalidad de subvención en el que se modelará con GOTHIC otros sistemas de contención como los enfriadores. ■

# EXPERIENCIA REGULADORA EN EL DESMANTELAMIENTO DE CENTRALES NUCLEARES

**Autor: José Luis Revilla**

Coordinador técnico de la Subdirección de Protección Radiológica del Público y Vigilancia Radiológica Ambiental

El cese definitivo de la explotación de una central nuclear constituye un hito fundamental en su vida como instalación nuclear. Con anterioridad a dicha fecha, hay una intensa actividad regulatoria a medida que el operador toma decisiones sobre cómo proceder para su desmantelamiento y clausura. Este punto da inicio a una serie de actividades, cuyo objetivo final no es la producción de energía, sino permitir que su emplazamiento salga del ámbito del control regulador al que ha estado sometido hasta entonces.

Actividades diferentes a la operación normal precisan regularse también de una manera distinta a la habitual. El artículo refiere la experiencia del CSN en el desmantelamiento de centrales nucleares y las lecciones aprendidas que presentan un mayor interés regulador, bien porque contemplan aspectos de control y supervisión novedosos frente a los habituales de su etapa operativa o porque modifican sustancialmente el enfoque regulador con el que se debe abordar dicha etapa.

El cese definitivo de explotación de una central nuclear constituye un hito fundamental en su vida como instalación regulada. Marca el inicio de un proceso, cuyo objetivo final es su clausura y salida del ámbito del control regulador. La previsión del

futuro cese de explotación de una central nuclear y su posterior desmantelamiento impone como tarea prioritaria del Consejo de Seguridad Nuclear una planificación temprana de la regulación de dichos procesos, atendiendo a lo que podríamos denominar «cultura del desmantelamiento».

El riesgo de criticidad, el más significativo durante la etapa operativa de una central nuclear, disminuye considerablemente una vez se haya descargado el combustible del reactor. Las actividades que siguen a continuación del cese presentan escenarios y situaciones muy distintas a las de operación, pero se deben seguir aplicando requisitos y criterios reguladores que garanticen la seguridad de la instalación.

Conforme al marco regulador español, el desmantelamiento de las centrales nucleares es competencia de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa) y, por tanto, es responsable de mantener la seguridad durante todo el proceso de desmantelamiento. Este cambio de titularidad hace que, además de la autorización ministerial para el inicio del desmantelamiento, se requiera simultáneamente de una transferencia de la titularidad de la central nuclear a Enresa, todo ello, tras los preceptivos informes del CSN.

Adicionalmente, la concesión de la autorización de desmantelamiento requiere que previamente se haya emitido la correspondiente declaración de impacto ambiental, tras haber evaluado el estudio de impacto

ambiental del proyecto. También se precisan conceder dos autorizaciones adicionales: la autorización de un nuevo servicio de protección radiológica y, en caso de que el combustible gastado permanezca en el propio emplazamiento, de una nueva autorización de protección física de la instalación.

Esta serie de autorizaciones presentan, además de las dificultades técnicas propias del cambio de finalidad de las actividades que se van a llevar a cabo en la central, las del distinto tipo de control regulador a implementar tras el cese definitivo de explotación de la misma.

El CSN cuenta con una experiencia nada despreciable en el licenciamiento y la supervisión del desmantelamiento de centrales nucleares, ya que en los últimos años se ha abordado el desmantelamiento parcial de la central nuclear Vandellós 1, transferida a Enresa en el año 1999 por su antiguo operador Hifrensa; el desmantelamiento casi completo de la central nuclear José Cabrera de Unión Fenosa, transferida a Enresa en 2010 y, más recientemente, el de la central nuclear Santa María de Garoña, transferida a Enresa en el año 2023 por su antiguo operador Nuclenor.

Las lecciones aprendidas por el CSN de esta experiencia se pueden estructurar dentro de cuatro etapas temporales, delimitadas por los tres hitos con mayor repercusión en el proyecto de desmantelamiento de las centrales nucleares: la declaración de su cese de explotación, la autorización de transferencia a Enresa para su desmantelamiento y, finalmente, su declaración de clausura. La reciente revisión del RINR incorpora ya en parte las conclusiones y lecciones aprendidas expuestas en el presente artículo.

### **La planificación temprana de la estrategia del desmantelamiento**

Una lección evidente, dada su repercusión en el futuro desmantelamiento de la central nuclear, es la necesidad de contar anticipadamente con una estrategia planificada que demuestre la viabilidad del desmantelamiento en condiciones seguras. Esta planificación incluye considerar aspectos no solo tecnoló-



gicos o económico-financieros, sino también los organizativos, la previsión de gestión de los materiales residuales o, incluso, aspectos político-sociales que pudieran resultar afectados por el desmantelamiento.

La planificación estratégica debe comenzar ya en la fase de diseño y construcción de la central nuclear, continuar a lo largo de su vida operativa y estar en condiciones de su aplicación tras el cese definitivo de su explotación.

La reciente Instrucción del Consejo IS-45 regula los requisitos de seguridad que se deben tener en consideración durante las fases de diseño, construcción y explotación de las instalaciones nucleares para prever su futuro desmantelamiento, y enfatiza la necesidad de considerar y planificar los desmantelamientos de las centrales nucleares con an-

telación suficiente al fin de su etapa operativa.

Entre otros requisitos, la IS-45 requiere que las centrales nucleares operativas dispongan de un Plan Preliminar de Desmantelamiento desde el inicio de su diseño. Esta planificación previa de las futuras actividades de desmantelamiento ha resuelto los retrasos en el diseño final del plan de desmantelamiento de la instalación y su implementación inmediata terminada su vida útil, que se presentaban cuando no se disponía de una estrategia anticipada.

### **Cooperación en la estrategia del desmantelamiento**

La elaboración del Plan Preliminar de Desmantelamiento sirve también para poner de manifiesto otra de las lecciones aprendidas: la necesidad de que en su elaboración



participen de forma conjunta el titular actual (operador de la central) y Enresa, futuro titular del desmantelamiento.

El Plan Preliminar de Desmantelamiento de la central nuclear deberá ajustarse a la estrategia general contemplada en el Plan General de Residuos Radiactivos y contar necesariamente con la cooperación de Enresa, entidad encargada de su ejecución. Su versión inicial deberá incluir una cantidad mínima de detalles y muchas de sus conclusiones deberán basarse necesariamente en suposiciones lo más realistas posibles en el momento de su edición, y actualizarse en posteriores revisiones con información sobre cambios de equipos, estructuras o procesos, cambios derivados de sucesos no planificados, cambios en la gestión de residuos radiactivos, actualización de las condiciones radiológicas,

cambios en los requisitos legislativos, mejoras en la tecnología, etc.

#### **Coordinación entre el titular de operación y Enresa**

El cese de explotación, periodo que transcurre desde el fin de la operación de la central hasta que se produce la transferencia de su titularidad a Enresa y comienza el nuevo esquema regulador para el desmantelamiento, se ha revelado como una etapa especialmente crítica.

Este periodo es particularmente difícil desde el punto de vista regulador, ya que, con la central aún bajo la titularidad del operador, coexistirán actividades de predesmantelamiento, ejecutadas por el propio titular antes de la transferencia a Enresa, con otras de preparación del desmantelamiento, que forzosamente debe diseñar e incluso ejecutar Enresa. La vigi-

lancia y control de los procesos y actividades en esta etapa debe realizarse de forma exhaustiva. El hecho de que se produzcan numerosas modificaciones en los equipos, instrumentación, componentes y procesos no debe menoscabar la seguridad alcanzada durante la operación.

Esta etapa de transición precisa una cuidadosa planificación por parte del titular de la operación, responsable último de la seguridad de la central. El período puede ser confuso y estresante para los trabajadores de la planta, la incertidumbre sobre el futuro de los trabajadores puede llegar a comprometer la seguridad de la instalación, por lo que es preciso tomar acciones para que la cultura de seguridad de la organización no se debilite. Además, podrán aparecer una serie de problemas en la planta y serán necesarias determinadas modificaciones de las bases de licencia y adaptaciones del diseño inicial de la instalación para cumplir con los objetivos y requisitos asociados a esta etapa. También se precisan cambios en la gestión de la organización y la existencia de planes de recursos humanos para responder a nuevos objetivos y a diferentes prácticas de trabajo.

El esquema planteado en el contrato tipo para la transferencia de titularidad entre las centrales nucleares y Enresa implica que la responsabilidad de determinadas actuaciones clave se deban realizar entre ambos titulares, lo que exige mantener, desde el punto de vista regulador, una clara delimitación de cometidos y una detallada planificación y coordinación.

Una regulación eficaz de esta etapa implica reuniones periódicas del regulador con ambos titulares para el seguimiento de los temas en curso, para determinar aspectos pendientes de cierre y establecer las actuaciones necesarias que requieran de continuidad hasta el posterior desmantelamiento.

Un aspecto importante es la identificación de los sistemas, equipos y componentes de planta que se precisen mantener operativos para las futuras actividades de desman-

telamiento de la central. Estos sistemas, equipos y componentes, que durante el período de cese de explotación pueden mantenerse en descargo, necesitan, sin embargo, un programa de mantenimiento activo que garantice su operabilidad tras su «inactividad» para, en caso de ser necesaria, su reactivación en el inicio del desmantelamiento.

### **Nuevas condiciones y bases de licencia tras el cese definitivo**

El cese de explotación de una central nuclear plantea un escenario diferente a cualquier otro estado de operación. El riesgo de criticidad y la carga radiológica o término fuente comienza a reducirse al evacuar el combustible de la piscina. Sin embargo, se incrementan los riesgos radiológicos para el personal expuesto, debido a trabajos que implican contacto o cercanía a fuentes irradiantes. El riesgo más significativo está asociado a la manipulación y traslado del combustible gastado.

Aunque la declaración de cese de explotación no sea desde el punto de vista reglamentario una nueva autorización, es a todos los efectos el inicio del desmantelamiento. Se procedimentan nuevas actividades y operaciones ajenas a la operación de la central, por lo que resulta necesario modificar algunos límites y condiciones de la autorización vigente, con base en los riesgos planteados por las actividades preparatorias y de predesmantelamiento que se prevén realizar durante el periodo. En consecuencia, se imponen nuevas bases de licencia para la supervisión y control de la instalación.

### **Gestión de combustible gastado y residuos radiactivos**

La actividad de predesmantelamiento más significativa es evacuación del combustible gastado de las piscinas de enfriamiento de la central. Antes de su transferencia a Enresa, el titular de la explotación deberá haber evacuado el combustible de la piscina o deberá disponer de un plan alternativo de gestión aprobado.

Excepto en el caso de la central nuclear Vandellòs 1, la gestión del combustible gastado ha consistido en el almacenamiento en seco, en

contenedores ubicados dentro del emplazamiento de la propia instalación, los almacenes temporales individualizados ATI.

Por la experiencia hasta la fecha, aunque estos almacenes ATI han sido licenciados como modificaciones de diseño en el contexto de la operación de la central, proceso suficientemente conocido y normalizado, su planificación y construcción se ha retrasado por causas diversas.

La puesta en operación de los ATI ha requerido en ocasiones de la aprobación simultánea del diseño de los contenedores del combustible gastado, interfiriendo ciertamente el licenciamiento del desmantelamiento y retrasado la disponibilidad del ATI como instalación auxiliar del propio desmantelamiento, lo que ha implicado serios inconvenientes en el proceso de transferencia de titularidad de la central a Enresa. El objetivo que se desprende de la lección aprendida es comenzar la evacuación al ATI del combustible gastado de la piscina, ya en los últimos momentos de explotación de la central, y que esta se lleve a cabo mayoritariamente antes del inicio del desmantelamiento.

La regulación actual indica que antes de la transferencia de la central para su desmantelamiento, el titular ha de gestionar y acondicionar los residuos radiactivos procedentes de su operación.

La experiencia indica, no obstante, que dicha premisa no siempre se cumple, especialmente con los residuos radiactivos de gran volumen procedentes de modificaciones o del mantenimiento efectuado durante la etapa operativa, sobre cuya procedencia y gestión (operación o desmantelamiento) caben interpretaciones diversas.

Resulta necesario definir claramente las responsabilidades en la gestión de los residuos radiactivos, diferenciando entre los procedentes de la operación (responsabilidad del titular) de los de desmantelamiento (responsabilidad de Enresa), ya que esta delimitación no tiene por qué estar regida en exclusiva por cuestiones terminológicas o de temporalidad y puede, como ya ha ocurrido,

variar en virtud de los acuerdos que se alcancen. El aspecto clave a controlar, tras el cese de explotación, es minimizar el material residual procedente de operación y que los residuos radiactivos remanentes tengan asignados claramente al responsable de su gestión posterior.

El momento en el que realmente surge la necesidad de clarificar esta diferenciación es el momento del cese de explotación de la central. La última revisión del Plan de Gestión Residuos Radiactivos y Combustible Gastado de la instalación deberá actualizar el inventario final e incluir los acuerdos de transferencia al respecto entre el titular y Enresa.

### **Caracterización radiológica y física de la instalación**

La seguridad de las actividades de desmantelamiento descansa en gran medida en la validez de la caracterización radiológica de la instalación. Esta «adquisición de datos» a abordar desde el inicio de la operación de la instalación es una tarea muy relevante para la preparación del desmantelamiento, en la que Enresa tiene un papel fundamental. En ocasiones, esta caracterización inicial o preliminar no resultará suficiente y precisará caracterizaciones adicionales simultáneas a las propias actividades de descontaminación.

En la experiencia habida, los planes y programas de caracterización se evalúan *a posteriori*, con base en sus resultados, una vez realizada la caracterización. Esta situación de «hechos consumados» deja pocas posibilidades de considerar requisitos reguladores que hubieran podido pasar desapercibidos inicialmente y que pueden obligar posteriormente a complementar o modificar dicha caracterización.

En este contexto, es importante contar con el visto bueno regulador previamente a la implantación del programa de caracterización, que incluirá tanto la metodología de caracterización, con los criterios para los muestreos y adquisición de datos, como la garantía de calidad de todo el proceso de caracterización. Se evitaría así que, posteriormente, durante la evaluación de la seguridad de las actividades de desman-



Enresa es la encargada de llevar a cabo las labores de desmantelamiento de las centrales nucleares

telamiento, se cuestione la calidad de los datos de caracterización en las que se soportan.

### Transferencia de titularidad

La transferencia de funciones, responsabilidades, documentación, etc. entre la organización de explotación y la organización encargada del desmantelamiento es trascendental, debiendo ponerse un énfasis especial en su planificación y control a incluir en las últimas ediciones del Plan Preliminar de Desmantelamiento de la central. Se establecerán medidas para que el personal de explotación disponga del mayor grado posible de conocimientos y de experiencia en la planificación y en el diseño de las actividades de desmantelamiento.

Los acuerdos de transferencia de titularidad establecen contractualmente los mecanismos y procedimientos que permiten a Enresa el acceso a los archivos de operación de la central y así utilizar toda la información disponible que se considere relevante para el diseño final y para la ejecución del Plan de Desmantelamiento.

La transferencia de titularidad del antiguo operador a Enresa implica la necesidad de transmitir el conocimiento que se tiene de la instalación. A este fin, se considera imprescindible que Enresa cuente no solo con un conocimiento documental, sino también con la asistencia de personal clave procedente del antiguo personal de operación como son los supervisores y los operadores.

Según la normativa actual, Instrucción del Consejo IS-11 «Sobre licencias de personal de operación de CC. NN.», la transferencia de titularidad de la instalación implica la pérdida de vigencia de las antiguas licencias del personal de operación (supervisores y operadores), lo que implica la necesidad de una nueva concesión de las licencias, una vez Enresa sea titular de la instalación.

Dados los términos temporales en los que se produce la transferencia de titularidad, resulta necesario habilitar un proceso administrativo flexible de convalidación de las licencias heredadas del antiguo titular. Se precisa, a este efecto, disponer de una prórroga de la vigencia de estas licencias hasta que se pue-

dan adecuar a las nuevas actividades de desmantelamiento.

### Documentación de licencia del desmantelamiento

La experiencia demuestra que el desmantelamiento no es simplemente una extensión de la operación o un nuevo modo de funcionamiento de la central. Si bien, las primeras actividades de predesmantelamiento tras el cese de explotación se parecen a las realizadas durante la operación, pronto comienzan actividades de descargo de sistemas de la instalación y se construyen otros específicos para las labores del desmantelamiento.

Los documentos de licencia de la autorización de desmantelamiento tienen, en general, denominaciones similares a los de las instalaciones operativas, aunque con objetivos muy diferentes. Esto es especialmente relevante en los documentos que deban reflejar la irreversibilidad y el dinamismo propio de las actividades de desmantelamiento como son el estudio de seguridad, las especificaciones técnicas, etc.

Estos documentos precisan de una redacción más flexible que duran-

te la operación y deben reflejar la constante evolución física y radiológica de la instalación, así como la paulatina disminución de los riesgos que se originan en los procesos de desmantelamiento. Todo ello, sin que se pierda la capacidad para poder ejercer una evaluación de la seguridad de las actividades a llevar a cabo y posibilitar su control y supervisión durante su ejecución.

Dada la frecuente modificación de la documentación oficial a lo largo del desmantelamiento, se precisa una delimitación clara y precisa de los aspectos que deben recogerse en cada documento oficial y cuáles no conviene duplicar, así como la remisión de determinados temas a documentos o estudios soporte independientes. Se pretende evitar con ello que determinados aspectos «regulables», o que precisen de autorización específica, aparezcan simultáneamente en distintos documentos objeto de licencia, obligando a una permanente revisión en cascada de los mismos cada vez que se modifique uno de estos aspectos.

### **Modificaciones de diseño y actividades pendientes de revisión**

Las modificaciones de diseño en la etapa operativa de las centrales nucleares tienen por finalidad mejorar o reformar determinados sistemas, sin implicar, en lo posible, la paralización del proceso productivo de generación energética. Por el contrario, el desmantelamiento supone una modificación física permanente e irreversible de la instalación a la vez que una alteración continua de su mapa de riesgos radiológicos.

Ya desde el inicio del desmantelamiento de una central nuclear se contemplan tareas de desmontaje, demolición o reacondicionamiento de sistemas, estructuras y componentes importantes para la seguridad, para cumplir tareas y funciones en configuraciones diferentes, o bien la construcción y puesta en servicio de nuevos sistemas e instalaciones auxiliares no previstas en el diseño original de la central.

Este hecho tiene importantes implicaciones dentro de un esquema regulador acostumbrado a situaciones en las que las modificaciones

físicas de la instalación no se producen de manera continua ni son programadas sistemáticamente de manera secuencial.

Determinadas modificaciones de diseño o actividades significativas del desmantelamiento pueden encontrarse inicialmente poco definidas o, en el momento de su ejecución, pueden verse alteradas por un resultado imprevisto de actividades precedentes. Estas modificaciones no evaluadas previamente, bien por falta de los datos o por indefinición en el momento inicial, se deben identificar como de «seguridad no revisada» y ser sometidas a una autorización específica previa a su ejecución, si supusieran cambios en la seguridad o en las condiciones de licencia del proyecto.

### **Modos de operación durante el desmantelamiento**

Una lección aprendida de la experiencia es la necesidad de organizar las actividades de desmantelamiento con base en «modos de operación» o «modos de planta» (A, B, C, D, E, etc.). Modos asimilables a situaciones de disminución progresiva del riesgo de la instalación a medida que se ejecuten cada una de las distintas actividades y operaciones de desmantelamiento. Cada uno de estos modos (identificados con letras para diferenciarlos de los modos de operación de centrales en explotación) estarían asociados a diferentes medidas de protección y requisitos de seguridad y servirían de base para sucesivas revisiones de los documentos oficiales del proyecto.

El modo inicial de las actividades de desmantelamiento (modo A) coincide con la situación de la central al finalizar su explotación. Este modo sería aplicable a las actividades para la preparación del desmantelamiento en el cese de explotación antes de la transferencia de titularidad a Enresa. Tras la evacuación del combustible gastado de la piscina, la instalación pasaría al siguiente modo de operación (modo B).

El propio desarrollo del desmantelamiento haría que las sucesivas actividades fueran progresivamente alcanzando modos que implica-

sen requisitos distintos y menos exigentes hasta llegar al último (modo X), lo que significaría situar la instalación fuera del control regulador. Dependiendo de actividades concretas pudiera darse el caso de que, puntualmente, la evolución de modos fuera a la inversa, debido a actividades que implicasen mayores requisitos de seguridad. Se pueden adaptar así los requisitos técnicos y recursos humanos a las necesidades reales que se plantean en cada momento de la evolución del proceso de desmantelamiento.

### **Programación de las inspecciones durante el desmantelamiento**

La inspección y control asociados a una central nuclear en desmantelamiento se revelan básicamente diferentes a los implementados de manera habitual en las centrales en operación, al tener que considerar dos tipos de inspecciones.

Por una parte, determinadas áreas de supervisión se pueden integrar dentro de un plan base de inspecciones periódicas similar al realizado durante la etapa operativa de la central, adaptando la frecuencia al



*Imagen actual de la central nuclear Vandellós I cuyo desmantelamiento aún no ha finalizado*

desarrollo del proyecto (véase inspecciones anuales a los planes de emergencia, inspecciones a los programas de formación, al control de efluentes radiactivos, a la gestión de residuos, a los programas de vigilancia en el emplazamiento, etc.).

Existen otras actividades propias de la etapa de desmantelamiento activo que, por sus características únicas e irreversibles, es necesario inspeccionar en el momento en que se vayan a realizar, sin que sea posible, por lo general, programarlas con una gran anticipación.

Un control y supervisión real de estas actividades propias del desmantelamiento requiere tener una capacidad de respuesta y una disponibilidad inspectora en el momento en el que se lleven a cabo. Para someter a inspección directa estas actividades, se debe estructurar un procedimiento que no quede sometido a una rutina temporal establecida en los programas base de inspecciones, sino que respondan a la demanda técnica y temporal de las actividades que se vayan a llevar a cabo.

### Declaración de clausura

El objetivo de todo el proceso de desmantelamiento es llevar a la instalación nuclear a una situación final previamente establecida, que permita autorizar su liberación del control reglamentario. Normalmente, esta situación implicará su demolición total y, tras restaurar su emplazamiento, proceder a la liberación del mismo, con o sin restricciones radiológicas. El final del desmantelamiento de una instalación nuclear (*end of decommissioning*) también puede establecerse, dependiendo de la estrategia planteada, en su rehabilitación para otros fines.

Esta última etapa del proceso de clausura comprende la realización de exhaustivas vigilancias radiológicas, a fin de confirmar el cumplimiento con los criterios radiológicos establecidos para la liberación del emplazamiento del control regulador.

Esta etapa carece aún de suficiente experiencia práctica en la mayoría de países del mundo, ya que son escasos los emplazamientos completamente liberados. La carencia se manifiesta

tanto en el aspecto técnico como en el proceso regulador seguido para la verificación radiológica final de los emplazamientos que se van a liberar. Hay que tener en cuenta que, para verificar la ausencia de contaminación radiactiva, se precisa adaptar a escala industrial instrumentación y metodologías estadísticas para la detección de valores muy bajos de contaminación residual en grandes áreas de terreno.

Cabe destacar a este respecto la emisión de la Instrucción del Consejo IS-13 con los criterios radiológicos para la liberación de emplazamientos tras el desmantelamiento de las instalaciones nucleares, que ha sido una normativa prácticamente pionera en Europa.

La instrucción IS-13 ha dado lugar posteriormente a la elaboración de la guía del CSN GS 04.02 sobre el formato y contenido del Plan de Restauración del Emplazamiento (PRE) y la guía del CSN GS 04.03 en la que se indica la metodología recomendada para la verificación radiológica final del terreno antes de proceder a la declaración de clausura.

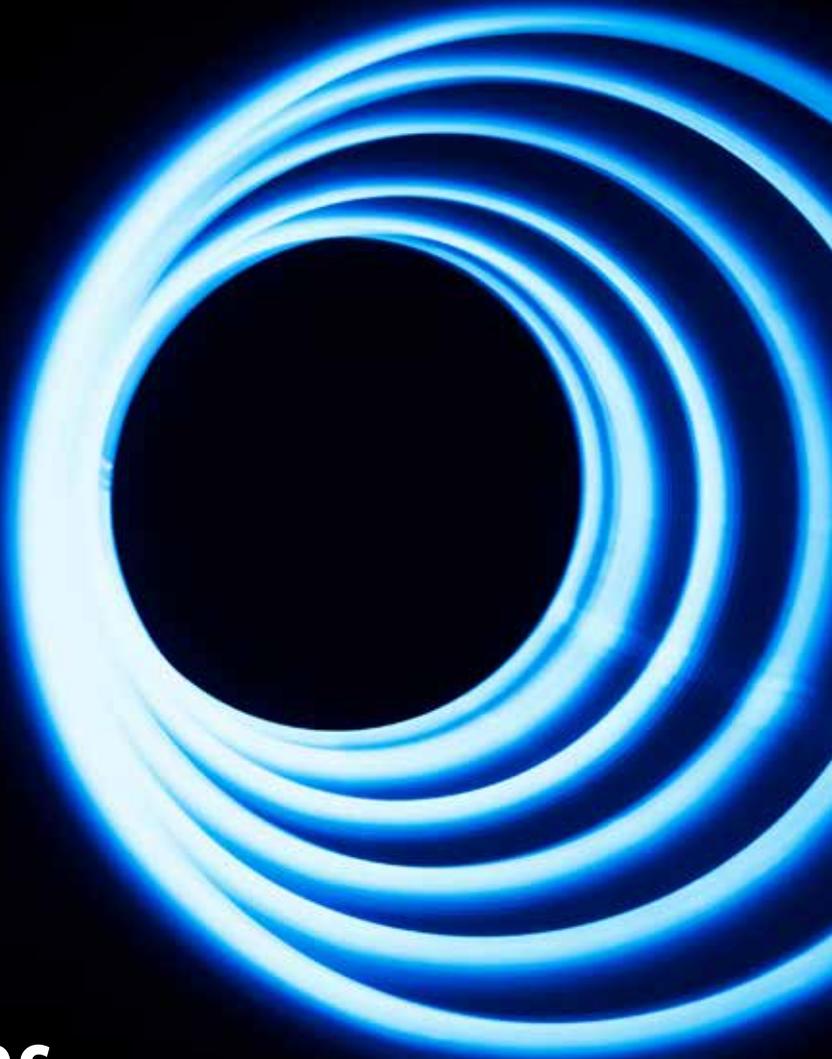
El estado final que se prevé para el emplazamiento se fija en la estrategia inicial de desmantelamiento, específicamente en el Plan de Restauración del Emplazamiento PRE. La experiencia indica que, una vez comprometido el estado radiológico para la liberación del emplazamiento en los momentos iniciales del desmantelamiento, no resulta fácil apartarse o desviarse del declarado originalmente para optimizar la protección radiológica si los resultados que se consiguen así lo aconsejan.

Un enfoque iterativo de esta caracterización de verificación radiológica final, capaz de evolucionar en función de nueva información adicional adquirida a lo largo de la restauración, resulta beneficioso cuando hay que adaptar la estrategia inicial al resultado de las actuaciones de desmantelamiento o cuando haya largos plazos en el proceso, por ejemplo, en una estrategia de desmantelamiento diferido. ■





*La música no solo era un arte placentero, sino un medio para contemplar la perfección divina, donde números y proporciones servían como puente hacia la verdad trascendental. Por la música, hacia Dios*



## De ondas y notas

Ciencia y música no son mundos separados. A lo largo de la historia, ambas disciplinas han formado un dúo inseparable que actúa como instrumento para comprender el universo y sus leyes, al tiempo que conmueve lo más profundo del espíritu humano con su belleza.

---

■ Texto: **Nikole von Appunn**

---

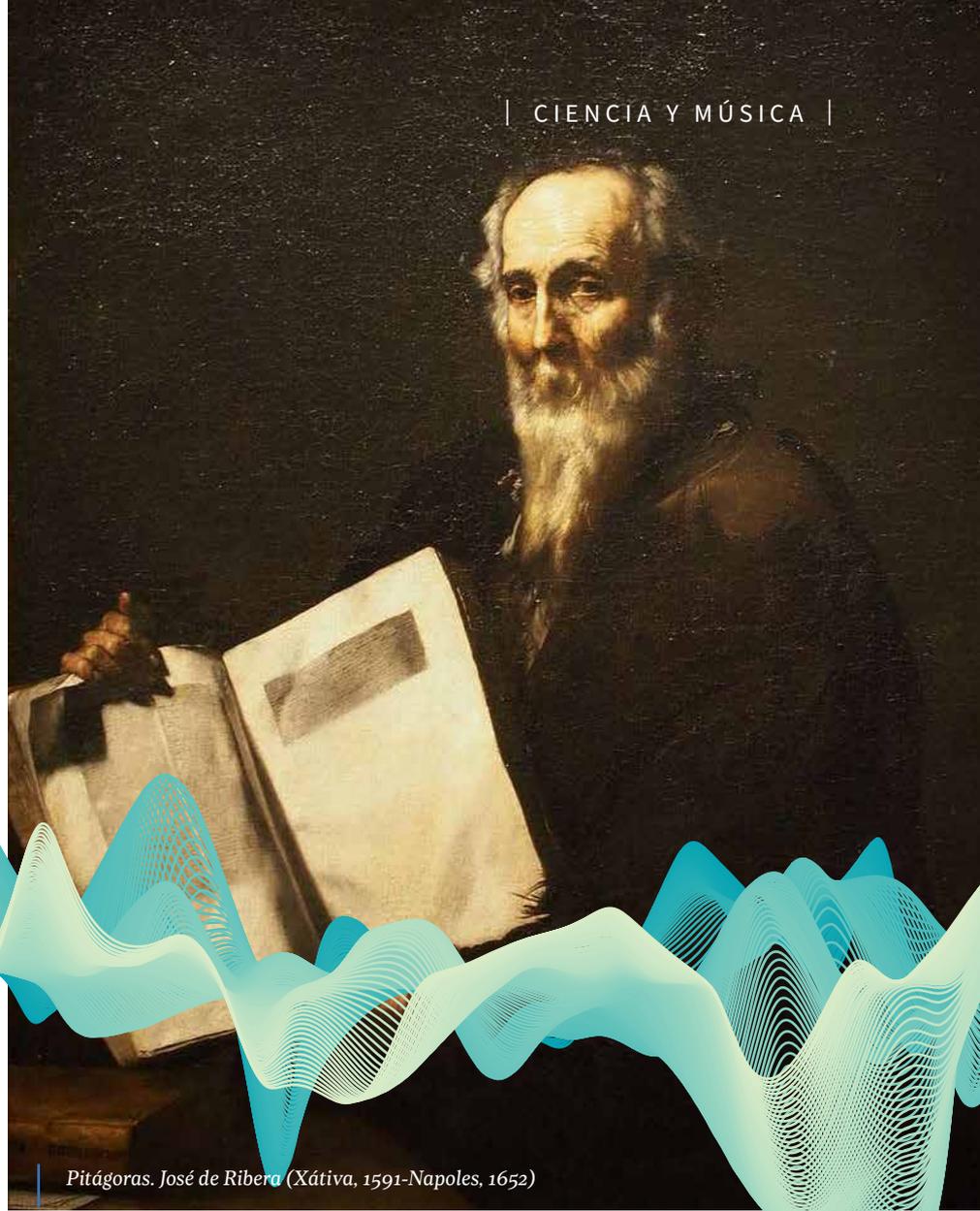
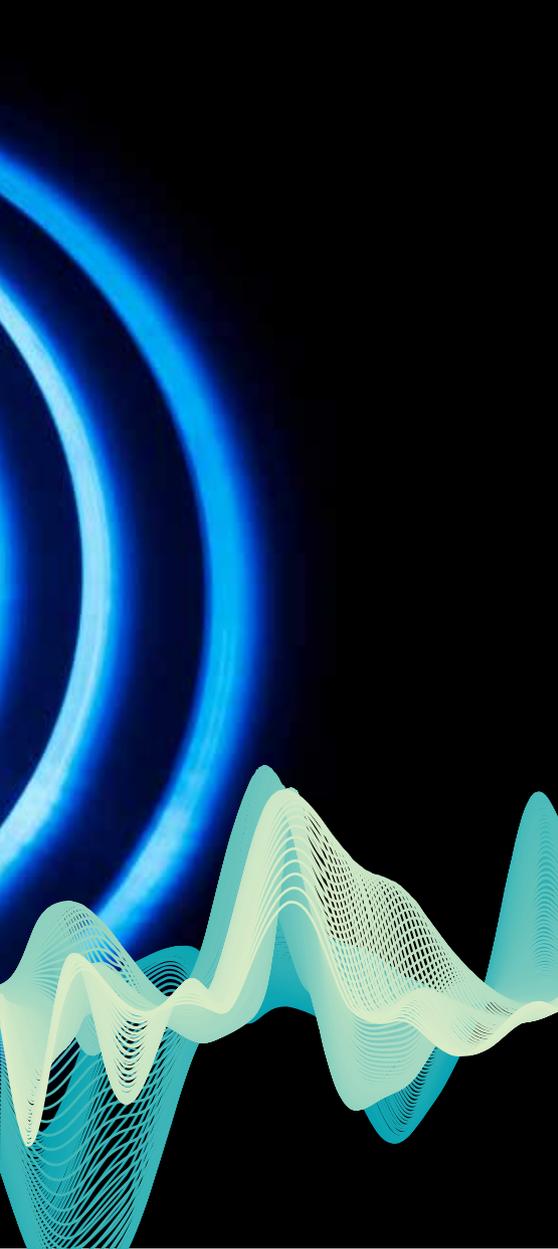
**A** ojos de los prejuiciosos, las artes y las ciencias pueden parecer materias situadas en polos opuestos. La vida, por el contrario, tiene un foco más generoso. Numerosas expresiones artísticas encuentran firmes cimientos en disciplinas como la física o las matemáticas. Un caso irrefutable es el de

la música. No en vano, las armonías que fundamentan una obra musical se basan en patrones reiterados y encadenados.

### **La semilla de Pitágoras**

A Pitágoras le corresponden los laureles de ser el pionero en vincular la música con las matemáticas. Al

estudiar los sonidos armónicos y su relación con los números enteros, formuló una teoría que sentó las bases de la música como la conocemos. Para ello, en su proceso deductivo, utilizó el monocordio, un instrumento de cuerda divisible en proporciones basadas en el número doce. Tras observar que ciertos



Pythagoras. José de Ribera (Xátiva, 1591-Napoles, 1652)

intervalos de longitud producían sonidos agradables, estableció los principios fundamentales de la armonía musical. La semilla estaba plantada.

La idea de la música como manifestación matemática del orden cósmico fue adoptada posteriormente por Aurelio Agustín de Hipona, a finales del siglo IV. En su obra *De Musica*, argumentó que los principios matemáticos subyacentes en el ritmo y las proporciones musicales eran expresiones sensibles de las leyes cósmicas. Para él, la música no solo era un arte placentero, sino un medio para contemplar la perfección divina, donde números y proporciones servían como puente hacia la verdad trascendental. Por la música, hacia Dios.

Considerado como el último romano y el primer escolástico, san Severino Boecio adoptó y expandió las ideas pitagóricas en su obra *De institutione musica*. En ella, no solo recuperó la noción de que la música está regida por leyes matemáticas, sino que integró la idea de que la música tiene un efecto sobre el alma humana. Tanto es así, que Boecio la consideraba como un medio para acceder a las leyes del universo y entender la armonía divina que permea la naturaleza. Una herramienta, por tanto, de sabiduría.

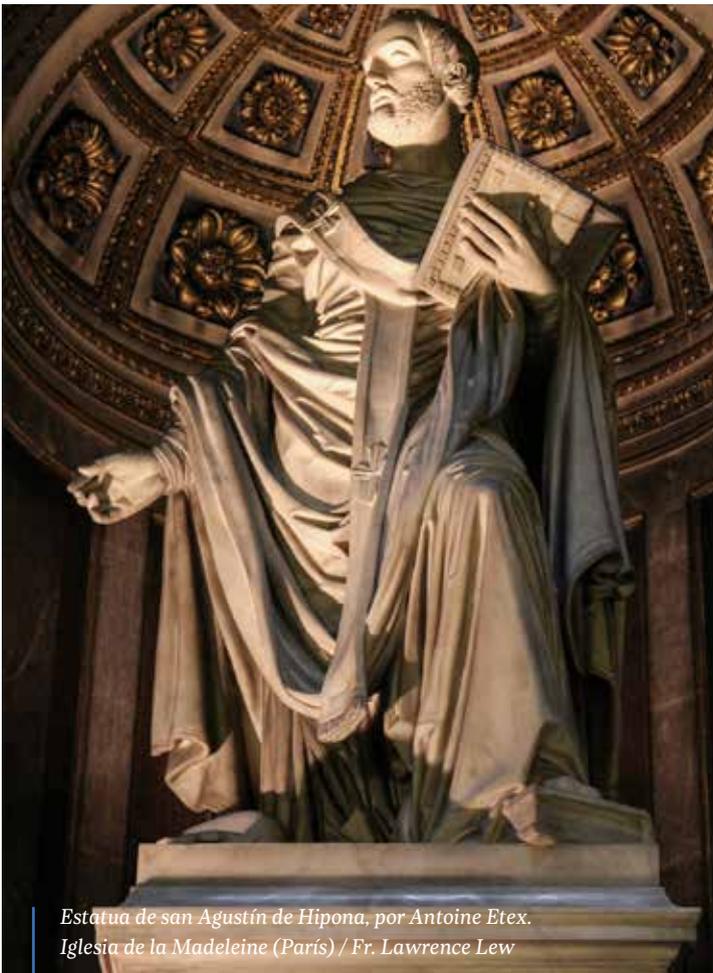
Johannes Kepler reitera esta representación de la música como expresión de la armonía. En su obra *Harmonices Mundi*, de 1619, establece una relación entre los intervalos musicales y los movimientos de los seis planetas conocidos en su época.

Aunque no creía que estos sonidos pudieran ser percibidos por el oído humano, sostenía que podían ser escuchados de manera metafísica por el alma. Según sus postulados, esta armonía universal es obra de Dios, creador que conecta la geometría, la astronomía y la música de forma perfecta, mostrando cómo estas disciplinas se entrelazan en un sistema ordenado.

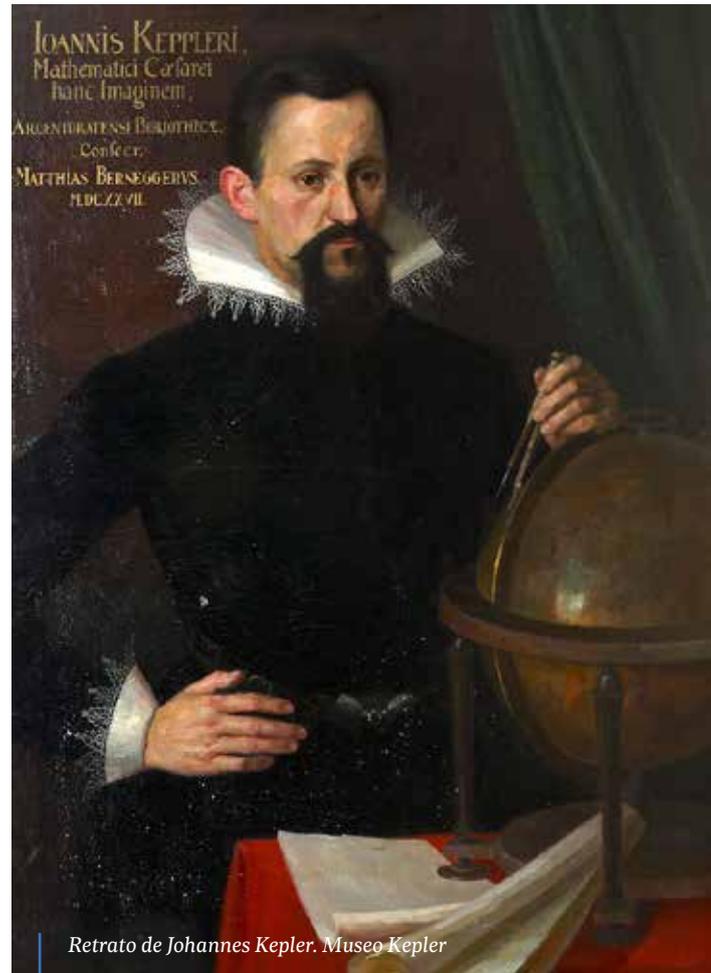
Aunque su contribución a la teoría musical no fue extensa, René Descartes, en su obra *Compendium Musicae*, abordó la música como una ciencia basada en proporciones matemáticas, explorando cómo los sonidos generan placer en el alma humana. Inspirado, como tantos otros, por la tradición pitagórica, estudió las consonancias musicales y la relación entre las vibraciones



La filosofía presentando las Siete Artes Liberales a Boecio, ca 1465, por el Maestro de Coëtivy



Estatua de san Agustín de Hipona, por Antoine Etex.  
Iglesia de la Madeleine (París) / Fr. Lawrence Lew



Retrato de Johannes Kepler. Museo Kepler



Retrato del compositor y químico Aleksandr Borodin

Borodin: Polovetsian Dances (themes)



Partitura correspondiente a Las Danzas Polovtsianas (o Danzas de los pólovtsy). Se trata del fragmento más conocido de la ópera El Príncipe Ígor, de Borodin



*Boecio consideraba la música como un medio para acceder a las leyes del universo y entender la armonía divina que permea la naturaleza. Una herramienta de sabiduría*

sonoras y la percepción. Así, integró música, matemáticas y filosofía, influyendo en la visión racionalista de las artes y en la conexión entre ciencia y percepción sensorial.

**La música es de ciencias**

Lo que dilucidaban filósofos y hombres de ciencia, a lo largo de la historia, es una realidad constatable: los patrones matemáticos están profundamente integrados en la música. Las estructuras de escalas, acordes y progresiones obedecen

a principios matemáticos, como la proporción áurea, que los compositores emplean para crear piezas equilibradas y agradables al oído, como hacen los pintores y escultores con su arte. Asimismo, conceptos matemáticos avanzados han sido fundamentales para el desarrollo de la teoría musical, como el análisis espectral y la síntesis digital, fortaleciendo el vínculo entre estas materias.

Hay más saberes que intervienen en el placer proporcionado, como diría Bach, por un clave bien temperado. La música, en su hondura, es una forma de arte basada en la física del sonido. La acústica, como rama de la física, resulta fundamental para comprender cómo se percibe la música. Los conceptos de intensidad,

tono y timbre derivan directamente del estudio de la vibración de objetos y del comportamiento del sonido en distintos medios. Esto ha permitido la afinación precisa de instrumentos y la creación de arquitecturas acústicas ideales. Si las matemáticas iban al fondo, la forma es una cuestión de física.

¿Cómo impacta el trabajo común de las matemáticas y la física –aplicadas al disfrute musical– en el cerebro humano? La ciencia ha investigado de qué manera afecta la música a las emociones. En 2019, un estudio impulsado por investigadores de diversas universidades catalanas y publicado en la revista americana *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* demostró una relación causal entre



*La química, ocupación profesional de Borodin, fue un pasatiempo delicioso para Elgar. Estaba especialmente interesado en los efectos acústicos de las reacciones químicas*

el nivel de dopamina y el placer al escuchar música: cuanto más dopamina libera el cerebro mientras se escucha una canción, más se disfruta y se quiere volver a escuchar o comprar.

### Entre dos aguas

Música y ciencia son amores generosos que no exigen exclusividad a sus devotos. En ocasiones, además, producen curiosos juegos de espejos entre sus participantes. Es el caso de Aleksander Borodin (1833-1887) y de Edward Elgar (1857-1934). Los dos se movieron con soltura en ambos territorios, si bien cada uno

plantó la bandera allí donde sus preferencias les fue acercando.

Borodin pasó a la historia como uno de los grandes compositores rusos, aunque, en realidad, desarrolló sus trabajos fundamentales en el ámbito de la química, donde fue muy respetado, particularmente por su conocimiento de los aldehídos. También se le atribuye, junto con Charles-Adolphe Wurtz, el descubrimiento de la reacción aldólica, una importante reacción en química orgánica.

En su reducido catálogo, destacan tres sinfonías (1867, 1876 y 1886 – inacabada–), el poema sinfónico *En las estepas del Asia Central* (1880), el *Cuarteto de cuerda n.º 2* (1881), célebre por su nostálgico *Nocturno*, y sobre todo la ópera *El príncipe Igor*, partitura en la que trabajó desde 1869 hasta su muerte. Inconclusa a su fallecimiento, fue finalizada por Rimski-Korsakov y Alexander Glazunov.

También el inglés Edward Elgar alcanzó sus mayores cotas de celebridad como compositor. Su *Pomp and Circumstance March No. 1* (1901) es célebre por su grandeza y simbolismo, un *must* de las ceremonias oficiales en países de habla inglesa. Además, dio rienda suelta a su carácter juguetón en piezas como las *Enigma Variations* (1899), que destacan por su creatividad, ya que cada variación retrata con sutileza a alguien cercano al compositor, siendo *Nimrod* la más famosa y conmovedora. Por último, el *Concierto para violonchelo en mi menor* (1919), una obra cargada de melancolía, captura la desilusión de la posguerra y es una pieza esencial del repertorio de este instrumento.

La química, ocupación profesional de Borodin, fue un pasatiempo delicioso para Elgar. Estaba especialmente interesado en los efectos acústicos de las reacciones químicas. Tan entregado estaba a este *hobby* que, en cierta ocasión, al mezclar fósforo rojo y clorato potásico, produjo una sonora explosión que, obviamente, no entraba en sus cálculos.

Su biógrafo, William Henry Reed, describe el incidente de una manera muy gráfica: «...escribiendo



Estatua de Edward Elgar, en Worcester (Inglaterra)

las partes de trompa y trompeta, y trazando las de viento madera, un repentino e inesperado estruendo, como el de toda la percusión de todas las orquestas de la tierra, sacudió la sala».

Más allá de este atronador tropiezo, tuvo al menos un logro químico que salvó su reputación de químico *amateur*: el diseño de un aparato para generar sulfuro de hidrógeno, que patentó y llamó «Elgar Sulphuretted Hydrogen Apparatus».

### Ciencia pop

Con la mano en el corazón, resulta obvio reconocer que la inmensa mayoría de músicos, especialmente las leyendas del rock y del pop, construyeron sus carreras por motivos que nada tenían que ver con la ciencia. Así, Bruce Springsteen se convirtió en *The Boss* con el indisimulado objetivo de impresionar a las señoras y The Beatles tuvieron como acicate, al menos durante sus inicios, la posibilidad cierta de lucrarse de manera desmedida. Otros han gustado de incorporar elementos de temática científica a sus composiciones y, de paso, han creado obras maestras.

David Bowie, al que la etiqueta de genio se le quedó pequeña, tuvo en *Space Oddity* el single que le abrió las puertas al estrellato en 1969. La canción, hoy ya un himno, relata como un astronauta ficticio, el Mayor Tom, emprende un viaje al espacio en solitario y reflexiona sobre la fragilidad de la Tierra mientras examina sus sentimientos de aislamiento y ansiedad. Como la historia rima cuando no se repite, en 2013, el astronauta canadiense Chris Hadfield se filmó a sí mismo cantando este tema, al tiempo que flotaba alrededor de la Estación Espacial Internacional.

En materia de excentricidad –y talento– la cantante islandesa Björk no se queda atrás. En algunas de sus hipnóticas letras ha picoteado en los límites de la ciencia, con metáforas que remiten a cuestiones de mayor calado. Valga como ejemplo *Cosmogony* de su álbum *Biophilia*, donde explora la creación del universo, con la teoría del Big Bang paseándose por la letra.



David Bowie en la fecha de publicación de *Space Oddity*



La cantante islandesa Björk en una imagen promocional de *Cosmogony*

Sin ser especialmente famoso, la medalla de oro de este palmarés es para el compositor y cineasta John D. Boswell, que en su tema *A glorious dawn* tuvo los arres- tos de tuncar muestras de voz de Stephen Hawking y de Carl Sagan e integrarlas en una pieza melódica. Es más, para la primera pista de la serie de vídeos *Symphony of Science*, utilizó fragmentos de la serie *Cosmos: A Spacetime Odyssey*, de Sagan, y la serie *Stephen Hawking's Universe* para crear un tema poético y educativo. ■



**Conceptos matemáticos avanzados han sido fundamentales para el desarrollo de la teoría musical, como el análisis espectral y la síntesis digital**

# ELEMENTOS COMBUSTIBLES PWR Y BWR

■ Texto: **José María Rey Gayo** · Jefe de Área de Ingeniería del Combustible Nuclear

Los elementos combustibles, tanto en centrales PWR (con reactores de agua a presión) como BWR (con reactores de agua en ebullición), que son los que componen el parque nuclear en España, se componen de una matriz cuadrada de barras de combustible que contienen óxido de uranio ligeramente enriquecido, rodeadas de una vaina de una aleación que contiene mayormente circonio.

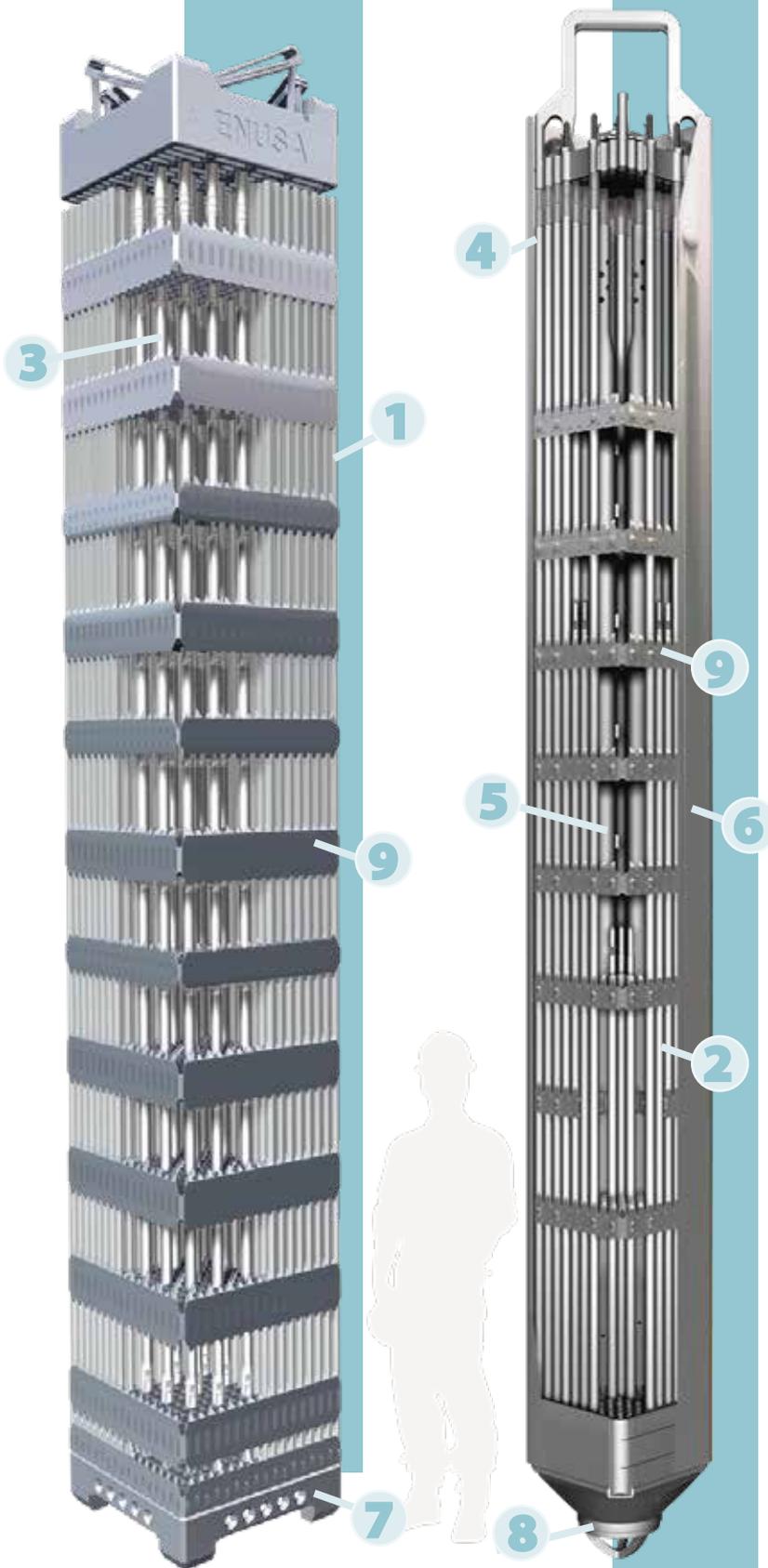
La matriz cuadrada mantiene la forma de variadas maneras, pero ambos tipos de elementos tienen una serie de rejillas con diversas funciones (esencialmente estructurales o mezcladoras de caudal). Las rejillas son de distintos materiales metálicos.

Los órdenes de magnitud son de unos 4 m de longitud en ambos tipos de reactores y secciones cuadradas de alrededor de 21-23 cm de lado en PWR y de 14 cm en BWR. En los reactores PWR españoles hay entre 155 y 180 elementos combustibles y en el reactor BWR, alrededor de 625.

En el futuro, los diseños podrán ser más o menos diferentes, dependiendo del modelo de reactor proyectado e introduciendo nuevos materiales en la pastilla (pastilla, como óxido de uranio con nuevos aditivos, siliciuros de uranio, etc. o nuevos materiales en la vaina, como aleaciones de circonio con recubrimientos, vainas con otras aleaciones metálicas, vainas cerámicas, etc.

**ELEMENTO PWR**

**ELEMENTO BWR**



**Diferencias más importantes entre los elementos de ambos tipos de centrales**

- 1** El elemento PWR tiene más barras de combustible (en España, actualmente, los diseños tienen 17 x 17 o 16 x 16).
- 2** El elemento BWR tiene menos barras de combustible (en España han evolucionado de 8 x 8 a 10 x 10, aunque se han cargado algunos elementos de 11 x 11).
- 3** En ciertas posiciones de la matriz cuadrada del elemento PWR hay unos tubos huecos por los que se desplazan las barras de control, que controlan la potencia del reactor. La posición central está reservada a otro tubo hueco por el que se puede introducir la instrumentación intranuclear.
- 4** En el elemento BWR, las barras de control no se desplazan por su interior, sino que tienen una forma cruciforme y lo hacen por el exterior, abarcando cada barra de control, 4 elementos.
- 5** En el interior del elemento BWR hay una o varias estructuras huecas, que pueden tener distintas formas según los diferentes diseños, para que circule agua por ellas, mejorando la moderación.
- 6** El elemento combustible BWR está recubierto por una estructura cuadrada que lo envuelve, denominada «canal». Aunque se puede poner y quitar, en el reactor está puesto.
- 7** El elemento combustible PWR se apoya sobre la placa inferior del núcleo.
- 8** El elemento combustible BWR se inserta, con una tobera, en la placa inferior del núcleo.
- 9** Rejillas.

Las figuras se reproducen con permiso de ENUSA

# Exhalación de radón en materiales de construcción: impacto radiológico y medidas correctoras (EXradón). Alcance y objetivos

**Juan Pedro Bolívar Raya**

Profesor de Física Aplicada. Director del Grupo de Investigación Física de Radiaciones y Medio Ambiente. Dpto. de Ciencias Integradas. Facultad de C.C. Experimentales. ■ Universidad de Huelva

**E**l proyecto «Exhalación de radón en materiales de construcción: impacto radiológico y medidas correctoras (EXradón)» tiene como objetivo solucionar los problemas de aplicabilidad encontrados en la medida de las propiedades de materiales de construcción con respecto al radón, más concretamente la exhalación y la constante de difusión. El objetivo general del proyecto es desarrollar una metodología robusta y fiable para medida de la tasa de exhalación y del coeficiente de difusión del radón para materiales de construcción, así como desarrollar un inventario de los materiales de construcción más usados en España. Los datos que se obtengan con esta metodología se usarán en viviendas e instalaciones construidas con dichos materiales, evaluándose en ambos casos la necesidad o no de establecer restricciones en algún parámetro o índice.

Una de las mayores contribuciones a la dosis efectiva por fuentes radiactivas naturales en la corteza terrestre es la que produce el  $^{222}\text{Rn}$ , radionúclido perteneciente a la serie del  $^{238}\text{U}$ , y que en promedio representa sobre el 40 % del total de la dosis efectiva recibida por la población. El radón, al ser un gas, puede escapar hacia el ambiente desde el suelo y, en algunos casos, acumularse en interiores. Este gas fue declarado agente carcinógeno de primera categoría por la Agen-

cia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) en 1998, estimándose que es responsable de un 9 % de las muertes por este tipo de cáncer en Europa. En España es la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco, responsable de unas 1500 muertes al año.

Por ello, la Directiva 2013/59/Euratom sobre protección sanitaria frente a las radiaciones ionizantes, tanto en entornos laborales como domésticos, trata de controlar la exposición al radón, estableciendo el nivel de referencia para la exposición ocupacional en  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Además, requiere que los Estados miembros pongan en marcha planes nacionales contra el radón e indica la necesidad de identificar viviendas, lugares de trabajo y edificios de uso público, en los que la concentración media anual de radón sea mayor que el valor de referencia, y considerar cualquier posible punto de entrada del gas radón para adoptar medidas de reducción de la concentración de radón. Como parte de las medidas tomadas en España, se ha publicado la norma 21682 en el *Boletín Oficial del Estado*, n.º 305, y en el *Código Técnico de la Edificación* aparece la exigencia de protección frente a la exposición al radón.

La principal fuente de entrada de radón en interiores se debe a la infiltración desde los cimientos de los edificios donde se genera, a través

de grietas o fisuras, o por difusión a través de los elementos de construcción. Los mismos materiales de construcción, dependiendo de la composición radiactiva, pueden generar radón y liberarse al ambiente interior de la habitación. El coeficiente de difusión de radón de los diferentes materiales de construcción es el parámetro que regula el transporte de radón a través de ellos y tiene un gran efecto en el flujo de radón a través de la superficie interna del edificio. La tasa de exhalación de radón es la medida del flujo de radón a través de las superficies interiores hacia el interior de una sala, ya sea vivienda o lugar de trabajo. Por lo tanto, estos parámetros tendrán que ser considerados cuando se estudie la posible acumulación de radón en interiores.

Existen normas internacionales que establecen la metodología para medir estos parámetros. Por un lado, la norma ISO 11665-9 (2016) establece las directrices para la medida de la tasa de exhalación de radón, mientras que la norma ISO 11665-13 (2017) define los pasos a seguir para la medida del coeficiente de difusión del radón. Sin embargo, ambas normas presentan algunos problemas de aplicabilidad que dificultan su uso en la práctica, por lo que es de gran importancia analizar cómo implementar estas normas en los laboratorios españoles y, si fuera

necesario, proponer su adaptación o simplificación.

Para facilitar la aplicación de la norma ISO 11665-13, en el proyecto se ha desarrollado un algoritmo que realiza los cálculos y resoluciones correspondientes a la ecuación del transporte de Rn en la membrana aislante o elemento constructivo en estudio. Este algoritmo se ha incluido en una aplicación con una interfaz intuitiva que será distribuida gratuitamente por el CSN. Esta aplicación permite introducir las medidas experimentales, junto con la información sobre el sistema experimental, realizando los cálculos necesarios para obtener las características del material con respecto al radón, mejorando la aplicabilidad de la norma ISO anterior.

Otra actividad del proyecto consiste en aprovechar el desarrollo de esta aplicación para realizar un inventario de materiales de construcción con sus propiedades radiactivas y con respecto al radón. Esto se hará tanto para los materiales más comunes usados en la construcción, como para los elementos constructivos finales obtenidos a partir de ellos, analizándose y justificándose también las razones físicas de los resultados obtenidos. La base de

datos que se obtenga será muy útil para las autoridades competentes en protección radiológica, salud y medioambiente.

Finalmente, empleando el conocimiento obtenido en las actividades previas y con el objetivo de controlar el nivel de referencia de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en aire establecido a nivel nacional para recintos cerrados, se podrán estimar las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en interiores en función de las características de los materiales de construcción y el medioambiente, lo que podría derivar en la proposición de ciertas restricciones para cualquiera de los mismos. Se desarrollará un modelo predictivo de concentración de radón en interiores debido a la exhalación de radón de los materiales de construcción y de la difusión de radón desde los cimientos del edificio. La metodología predictiva desarrollada se validará mediante la construcción, a escala de laboratorio, de un modelo de vivienda que permita incluir y modificar diferentes elementos constructivos. De esta forma, a partir de las medidas de la concentración de radón que tomemos en el interior del modelo a escala para estas distintas condiciones, podremos calibrar un modelo

capaz de predecir la concentración de radón en el interior de una vivienda o en un lugar de trabajo.

En conclusión, con este proyecto se pretende estudiar las normas existentes para la medida de distintas propiedades de los materiales de construcción en relación con la concentración de radón en interiores y aplicarlas a los materiales y elementos constructivos más utilizados en España. Asimismo, se pretende utilizar estos datos para evaluar sus implicaciones en viviendas y lugares de trabajo. De esta forma, los resultados del proyecto van a facilitar la aplicación de los planes nacionales contra el radón, reduciendo así la exposición ocupacional y poblacional al radón. ■

**Referencia:** PR-047-2021

**Plazo:** 23 de diciembre de 2021 (inicio)-22 de diciembre de 2025 (final)

**Entidad que lo desarrolla:** Universidad de Huelva

**Entidad financiadora:** Consejo de Seguridad Nuclear



Fuente: Organismo Internacional de Energía Atómica / A.Vargas

# Instituto de Fusión Nuclear

## Guillermo Velarde

Referente europeo en la Fusión  
por Confinamiento Inercial (ICF)



El IFN-GV fue creado como órgano asesor de la Presidencia del Gobierno y del Ministerio de Defensa para temas de fusión y fisión nuclear. De forma más específica, se centra en la Fusión por Confinamiento Inercial (ICF). Su misión principal es generar conocimiento científico y aportar soluciones tecnológicas en su ámbito para difundirlos a la sociedad.

■ Texto: Diego Álvarez | Fotos: IFN-GV



La misión principal del Instituto de Fusión Nuclear Guillermo Velarde (IFN-GV) es «generar conocimiento científico y aportar soluciones tecnológicas en los campos de la fusión y fisión nuclear, con la vocación añadida de trasladar estos avances a programas de formación y difundirlos a la sociedad», explica su director, Pedro Velarde. Tiene como propósito transferir el conocimiento generado a sectores productivos de la sociedad. Adapta e interpreta los fenómenos nucleares para aplicarlos a conceptos innovadores en campos como la plasmónica, la medicina y las fuentes renovables de energía e impulsa el avance científico y tecnológico de la fusión nuclear a nivel nacional, europeo e internacional.

Sus principales líneas de investigación se dirigen a los plasmas producidos por láseres de alta intensidad; los materiales en ambientes

extremos; la neutrónica, datos nucleares y física de reactores; la protección y seguridad en la fusión nuclear o el hidrógeno verde. En este punto, es posible relacionar al IFN-GV con otros centros nacionales de investigación en fusión nuclear, como el CIEMAT. Mientras que el IFN-GV está especializado en la Fusión por Confinamiento Inercial (ICF), el CIEMAT se centra en la fusión por confinamiento magnético. Sin embargo, áreas como los materiales y la neutrónica presentan un notable solapamiento entre ambos institutos. Además, el IFN-GV comparte intereses comunes con el Centro de Láseres Pulsados (CLPU) de Salamanca, especialmente en el estudio de la interacción láser-materia. Cabe destacar la participación del IFN-GV en la creación del Extreme Light Infrastructure (ELI), instalaciones europeas de láseres ultraintensos (ILE-PP), desde sus

inicios. También, su implicación en el proyecto HiPER, único reactor por ICF desarrollado en Europa, en colaboración con los países más avanzados, ambos incluidos en la hoja de ruta ESFRI.

### La fusión nuclear es un campo complejo

Los científicos del IFN-GV abordan la investigación en ICF a través de dos enfoques principales. Por un lado, mediante estudios teóricos realizados con códigos de computación, desarrollados en el propio instituto. Por otro, a través de la ejecución y análisis de experimentos llevados a cabo en instalaciones láser, sobre todo en el ámbito de la Unión Europea. «Estudiamos un reactor de fusión, principalmente inercial, desde los blancos (directos e indirectos) hasta la primera pared y el manto reproductor», explica



## El IFN-GV está especializado en la fusión por confinamiento inercial y el CIEMAT en la fusión por confinamiento magnético

sarrollo de modelos para la gestión de residuos radiactivos; se trata de métodos de caracterización y evaluación del daño por irradiación en las estructuras de confinamiento de dichos residuos de alta actividad», afirma José Manuel Perlado, presidente del IFN-GV. Otro ejemplo de transferencia de resultados a aplicaciones prácticas es la colaboración del centro con pequeñas empresas, como Nano4Energy, dedicada a la innovación, investigación y desarrollo en el área de modificaciones superficiales, especialmente mediante el procesamiento por plasma.

El IFN-GV colabora también con otras dos empresas de reciente creación, ubicadas en EE. UU. y Europa, enfocadas en el desarrollo y puesta en marcha de una planta de fusión nuclear por láser. «La colaboración abarca desde el diseño computacional de los blancos hasta el diseño y el plan de desarrollo tecnológico de los diversos sistemas que componen el reactor, a excepción de los láseres y la manufactura de los blancos», aclara Perlado. «Esta unión puede tener consecuencias importantes en el futuro, ya que está permitiendo visualizar la capacidad de nuestra industria en la construcción de estas instalaciones», enfatiza el experto, que considera que el ejemplo más claro de esta participación es el liderazgo de ESS-Bilbao, a través del Instituto IFN-GV, en el diseño y planificación de la cámara del reactor para la empresa germano-estadounidense.



Laboratorio del Instituto de Fusión Nuclear Guillermo Velarde

Pedro Velarde sobre las tecnologías clave que está desarrollando el IFN para avanzar en la investigación sobre energía de fusión. Estos «diseños de blancos» se llevan a cabo tanto en colaboración con grupos europeos (HiPER+) como con empresas de EE. UU. y Europa.

Otra tecnología clave para el estudio de la fusión se basa en el desarrollo de materiales, «bajo régimen altamente pulsado, ópticos y estructurales y diseños 3D neutrónico-fluido-termomecánico para la primera pared, envoltura reproductora, protección de óptica y generación y manipulación de tritio». Asimismo, el Instituto está comenzando a colaborar con empresas públicas y privadas en EE. UU. y Europa, en áreas clave, como las condiciones de licenciamiento de las instalaciones de potencia de fusión en general, y de ICF en particular, así como en la normativa de

validación de materiales en fusión. Todo enmarcado bajo el Proyecto HiPER+, con la colaboración destacada de KIT, Jülich, GSI, FZK Dresden en Alemania, el CEA en Francia, el ENEA en Italia, la UCLA en EE. UU. y el ESS-Bilbao en España.

### La unión hace la fuerza

La contribución del IFN-GV es esencial por su desarrollo histórico, influencia internacional y contribuciones científicas y técnicas. Además, como suele ocurrir en la investigación de excelencia, surgen iniciativas colaterales de relevancia. Como ejemplo, la de un grupo de científicos del IFN, que ha fundado una *startup* sobre hidrógeno verde, basada en patentes derivadas de su amplio conocimiento sobre materiales.

«También, en colaboración con el Ciemat, se está trabajando en el de-



Miembros del grupo de plasmas del IFNGV



*El Instituto estudia un reactor de fusión, principalmente inercial, desde los blancos directos e indirectos hasta la primera pared y el manto reproductor*

**Desafíos para afrontar el futuro**

El mayor desafío de la investigación en fusión nuclear consiste en lograr una mayor implicación de las instituciones nacionales y europeas en el desarrollo de la ICF, una técnica que demostró su viabilidad por primera vez en 2022 mediante la ignición en un proceso de fusión controlada. Asimismo, otro de los hándicaps del sector es atraer y consolidar la participación de empresas nacionales e internacionales en las diversas áreas relacionadas con la ICF: el diseño de blancos para generar energía y

los sistemas de reactor, desarrollar materiales para un futuro reactor de fusión y técnicas de reproducción y extracción de tritio y de protección de componentes en dicho reactor. Por supuesto, es «fundamental», establecer una legislación adecuada, basada en la ciencia y la tecnología avanzada para este tipo de plantas de potencia mediante la ICF y la fusión en general. Para José Manuel Perlado se trata de una tarea imprescindible en la que los organismos nacionales, europeos e internacionales «deberían aplicarse ya».

Otro desafío importante al que se enfrenta el IFN-GV es el desarrollo clave de los láseres de alta energía por disparo y alta repetición basados en nuevas aproximaciones, como los láseres bombeados por diodos, o los de excímeros. El desafío no solo es el desarrollo, sino la inmersión de la industria en la manufactura masiva que los haga atractivos económicamente. Un aspecto clave en este proceso de desarrollo es el establecimiento para la ICF de una capacidad industrial y una cadena potente de suministro de materiales y sistemas para que los haga económicamente fiables. Algo que todavía está lejos de alcanzarse.

Para los próximos cinco o diez años se esperan avances en el campo de los materiales, como la validación de nuevos recubrimientos para los componentes estructurales del reactor que permitan operar con fluidos de diversos tipos y mejorar la eficacia del reactor. También se espera responder de manera computacional a la propuesta de experimentos para la validación del efecto de la irradiación pulsada de los materiales en el reactor en general, un aspecto fundamental, según Perlado, «para establecer la auténtica vida real de los materiales en estas condiciones». «Es un área aún muy inexplorada que, según los pocos cálculos realizados hasta ahora, podría cambiar parcialmente la perspectiva de la resistencia de los materiales estructurales y ópticos en estas condiciones», detalla.

En el campo del diseño de la primera pared, durante este período, se espera lograr un diseño que contemple condiciones de refrigeración independiente y un mantenimiento adecuado, todo ello bajo un rendimiento económico asumible para la planta. Para el IFN-GV, un logro importante podría ser la validación de su propuesta para la utilización



Miembros del grupo de Materiales del IFNGV

de nanoesferas huecas de materiales pesados para su protección, así como de nanoestructuras o aleaciones de alta entropía. Por otro lado, en el campo de las envolturas reproductoras, se espera la validación de un diseño original previamente propuesto con reflector externo.

### Proyectos y colaboraciones

El IFN-GV participa en numerosos proyectos nacionales y europeos, al igual que con empresas y en los dos grandes proyectos europeos ESFRI relacionados con fusión inercial: HIPER+ y ELI. El instituto se encuentra presente en los únicos proyectos europeos sobre ICF dentro de EUROfusion. El Instituto ha propuesto y participa actualmente en varias iniciativas desarrolladas por la IAEA a lo largo de las últimas décadas, siendo uno de los pioneros, junto con los grandes laboratorios de láseres, en el impulso de numerosos Coordinated Research Projects (CRP) en el ámbito de la ICF. En la actualidad, participa en uno dedicado a «Materiales para la ICF». Además, ha coordinado el importante Proyecto TUMIEE, que reunió a los principales laboratorios de láseres europeos.

El IFN-GV posee Memorandum of Understanding (MoU) con grandes laboratorios del mundo en láseres, como el Lawrence Livermore National Laboratory, que ha logrado, por primera vez y por cualquier método de la Fusión en la historia, mediante la ICF-Láser la Ignición y Ganancia de Energía, dando pie a la demostración de la total viabilidad del proceso. Para el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) se contribuyó al estudio de seguridad de la National Ignition Facility –el láser de mayor energía en el mundo–, y al desarrollo de varios códigos de cálculo pioneros en el estudio del daño de materiales. Igualmente ha colaborado con el Institute of Laser Engineering de la Universidad de Osaka –referencia de láser para la ICF en Japón, poseedor de uno de los láseres de mayor energía en el mundo– y con la Academia de Ciencias de Rusia para estudios teóricos de blancos. En China, ha establecido un MoU de colaboración con el Shanghai Institute of Fine Optics, que dispone de algunos de los láseres más potentes de este país. También ha firmado en Argentina otros dos MoU, uno con la Universidad de Cuyo y otro con el Centro de Bariloche. ■

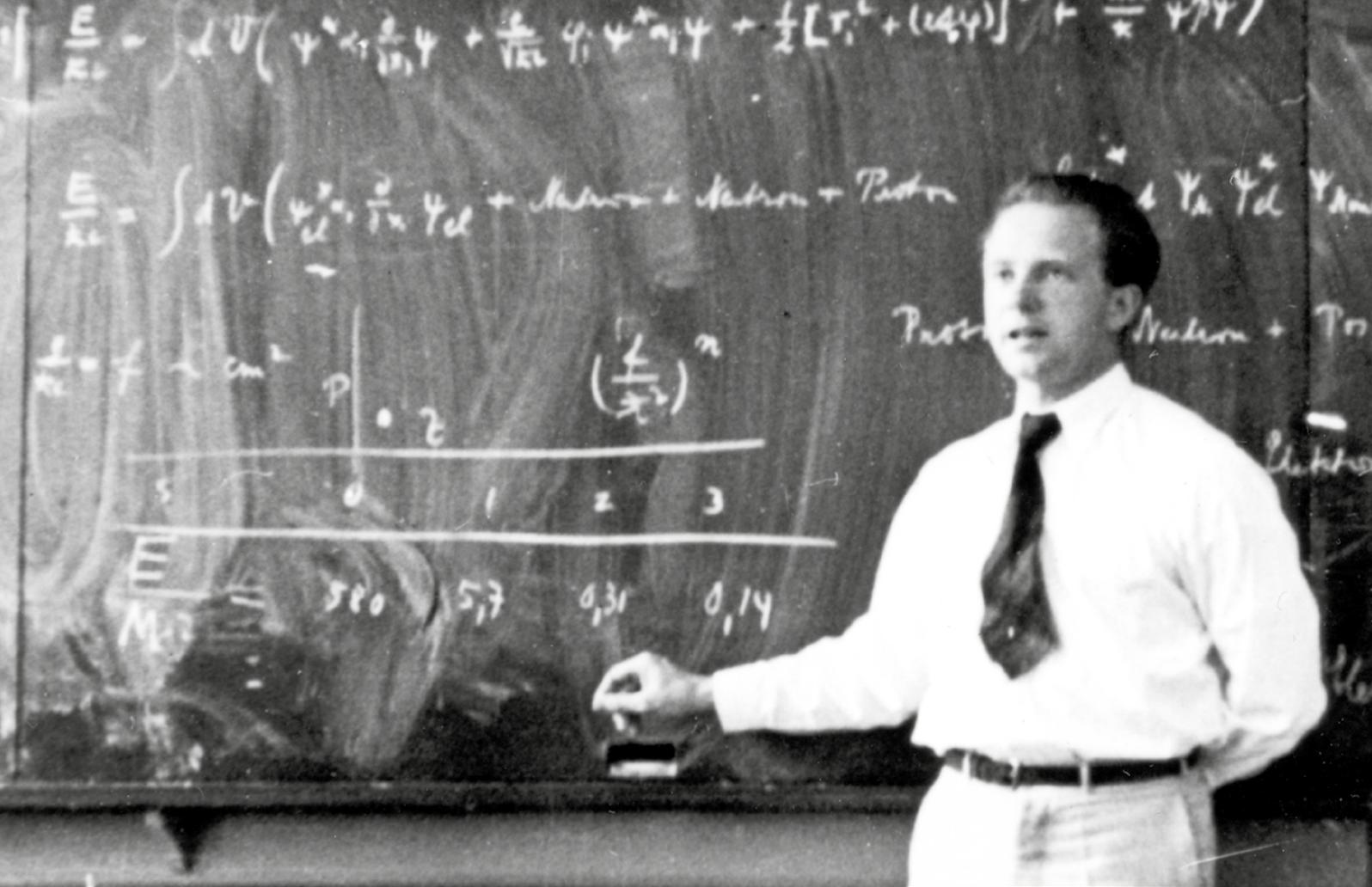
## Aportaciones y logros

Las contribuciones más destacadas del Instituto de Fusión Nuclear Guillermo Velarde se concretan en los siguientes hitos:

- Diseño de blancos para fusión inercial y de experimentos para comprender la física de algunos procesos de ICF.
- Desarrollo de códigos de simulación tanto de la evolución de los blancos de ICF, interacción láseres (del IR a rayos X) con la materia y generación de láseres de rayos X.
- Desarrollo de metodología validada por experimentos para la propuesta de materiales bajo irradiación para ICF; y experimentalmente, el desarrollo y caracterización de recubrimientos antiimpermeación y anticorrosión, así como de materiales de primera pared basados en nanoestructuras y materiales estructurales.
- Desarrollos de códigos neutrónicos para el estudio de activación neutrónica de los materiales y sus consecuencias en la seguridad y licenciamiento de las instalaciones.
- Diseños originales de Reactor de ICF basados en envolturas líquidas y sólidas con reflector para la eliminación o reducción del enriquecimiento de Litio y aumento de la eficiencia de ciclo.



*El IFN-GV se encuentra presente en los únicos Proyectos Europeos actuales sobre ICF dentro de EUROfusion*



Werner Heisenberg enseñando ecuaciones matemáticas en una clase en Copenhague, 1936

## Werner Heisenberg y los inicios de la mecánica cuántica

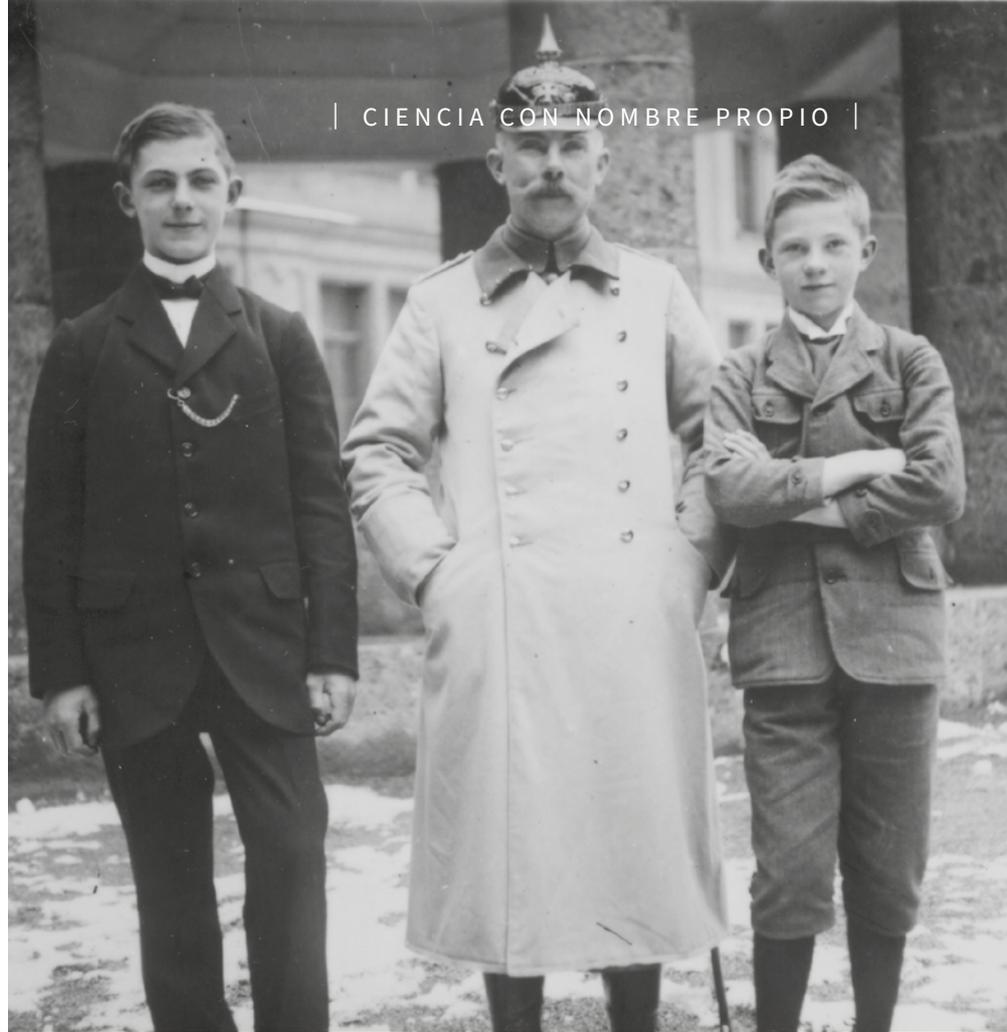
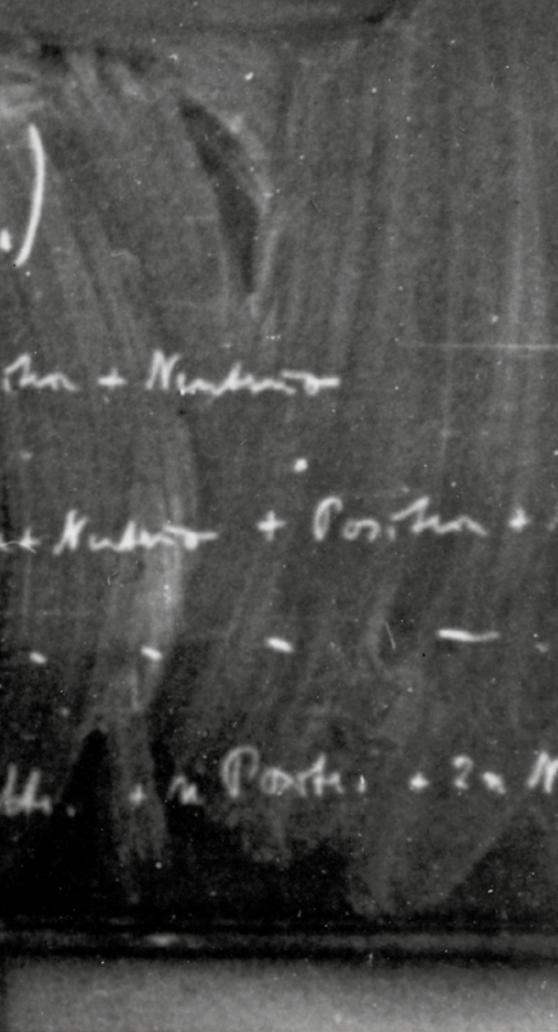
Creador del principio de indeterminación y de las bases matemáticas que darían lugar a la mecánica cuántica, la figura de Heisenberg, a veces ensombrecida por su participación en el Proyecto Uranio con el que Hitler quería construir una bomba nuclear, destaca por ser uno de los mejores físicos teóricos del siglo XX.

■ Texto: Isabel Robles | Fotos: Archivo

**W**erner Heisenberg nació en Wurzburg en diciembre de 1901. Segundo hijo de un profesor de lenguas clásicas que acababa de conseguir la habilitación para dar clase en la universidad, su infancia se vio marcada por la posición social de su padre, incluido en el círculo burgués y académico de la época, y por la excelencia que este le exigía. En 1910, la familia se

mudó a Múnich, la capital de Baviera. Heisenberg pronto destacó por su facilidad para las matemáticas, al ser capaz de resolver operaciones y problemas avanzados para su edad. La llegada de la Primera Guerra Mundial, los llamamientos a filas de los profesores –incluido su padre– y la ocupación de su escuela por el ejército provocaron que parte de su aprendizaje fuera autodidacta

y avanzara más rápido que sus compañeros de promoción. Una vez superado el examen para entrar en la universidad, Heisenberg se planteó estudiar Matemáticas, pero tras el rechazo de Lindemann, director del departamento, a dirigir su tesis doctoral, pronto se interesó por el estudio de la Física Teórica que le propuso Arnold Sommerfeld.



Heisenberg (derecha) con su hermano y su padre antes de que partiera al frente en la Primera Guerra Mundial



Niels Bohr (izquierda) y Werner Heisenberg (derecha) en la nieve en torno a 1932

### El avance de la física teórica

A pesar de que durante el siglo XIX la física experimental había destacado en Alemania, con el cambio de siglo comenzó a ganar fuerza la física teórica con figuras entre las que se encuentran Planck, Laue y Einstein. Así se crearon algunos institutos, como el de Sommerfeld, especializado en hidrodinámica y física atómica cuántica cuando Heisenberg comenzó allí sus estudios. Además, en aquella época, era uno de los pocos que estudiaba la espectroscopia. Fue allí donde Heisenberg conoció a Wolfgang Pauli, que se convertiría en uno de sus mejores amigos y colaborador destacado en el desarrollo de la mecánica cuántica. Sus estudios avanzaron rápidamente y, tras pasar un año en Gotinga como ayudante de Max Born, se doctoró por la Universidad de Múnich en 1923 con una tesis sobre hidrodinámica. Con marcada predilección por la teoría y no por la experimentación, en 1926 comenzó a trabajar como asistente de Bohr en el Instituto de Física Teórica

de Copenhague. Allí conoció a Einstein y desarrolló las bases matemáticas de la mecánica cuántica –fundamentadas en la teoría de matrices– y el principio de incertidumbre que le llevarían, en 1932, a obtener el premio Nobel de Física.

### La Segunda Guerra Mundial y el Proyecto Uranio

El Tercer Reich (1933-1945) fue una época complicada para la física en Alemania, no solo por el ambiente político, sino también porque el antisemitismo se expandía por todos los ámbitos de la sociedad, incluida la ciencia. Muchos profesores judíos y opositores huyeron a otros países, y los partidarios del régimen nazi rechazaron las teorías de científicos de origen judío como Einstein y lanzaron ataques contra sus defensores. A pesar de todo, Heisenberg permaneció en Alemania con otros científicos como Otto Hahn. En 1938, Lise Meitner, ya exiliada en Suecia, describió la fisión nuclear a partir de los experimentos que Hahn le había



*Erwin Schrodinger, el rey de Suecia y Werner Heisenberg en la ceremonia de los Premios Nobel*



*Niels Bohr, Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli en la conferencia de Copenhague 1936*



## *Las bases matemáticas de la mecánica cuántica, fundamentadas en la teoría de matrices, y el principio de incertidumbre le llevarían, en 1932, a obtener el premio Nobel de Física*

referido desde Alemania, lo que abrió la puerta a la creación de armas nucleares gracias a la enorme cantidad de energía que se libera en la fisión del isótopo U-235. Ante esta perspectiva, el Gobierno nazi suspendió la exportación de uranio y encargó a sus científicos que investigaran la reacción en cadena de la fisión nuclear para construir una bomba. Esto llevó a la creación del Proyecto Uranio, cuyo mayor teórico era Heisenberg, que a partir de 1942 también dirigió el Kaiser Wilhelm-Institut für Physik en Berlín. En 1941, Heisenberg viajó a Copenhague y se reunió con Bohr. Los motivos siguen siendo inciertos, quizá quería que Bohr colaborara con él o mostrarle que en realidad estaba trabajando en un reactor nuclear. Finalizada la guerra, ambos presentaron relatos opuestos de lo ocurrido. En cualquier caso, el programa alemán para crear una bomba nuclear no prosperó, en parte porque no se contaba con los recursos económicos necesarios para producir plutonio o separar U-235 –que se destinaban a otros esfuerzos más tangibles en la guerra– y en parte porque muchos de sus físicos más brillantes estaban en el exilio. Los esfuerzos para crear un reactor nuclear con agua pesada –procedente de Noruega– resultaron baldíos y nunca pasaron de prototipos en el laboratorio.

### **Operación Epsilon y reconstrucción de la ciencia europea**

En julio de 1945, los aliados capturaron a diez científicos alemanes entre los que se encontraba Heisenberg. Durante seis meses, fueron reclusos



Heisenberg con sus hijos. Una de sus pasiones más allá de la física era la montaña

*Durante seis meses, fueron recluidos en la mansión Farm Hall, cercana a Cambridge y plagada de micrófonos para que británicos y estadounidenses pudieran espiarles*

en la mansión Farm Hall, cercana a Cambridge y plagada de micrófonos para que británicos y estadounidenses pudieran espiarles. El 6 de agosto de 1945, cuando recibieron la noticia del lanzamiento de la primera de las bombas atómicas que cayeron sobre Japón, todos coincidieron en que no hubieran podido llevar a cabo ese proyecto con los medios con los que habían contado en Alemania.

En 1946, ya liberado, Heisenberg volvió a Gotinga para dirigir el Instituto de Física que, tras pasar a denominarse Max Planck Institut für Physik, se trasladó Múnich en 1958. Siete años después del fin de la guerra, los científicos alemanes consideraron que contaban con recursos suficientes para participar en proyectos de energía atómica,



Conferencia en Roma a la que asistieron, entre otros, Marie Curie y Heisenberg

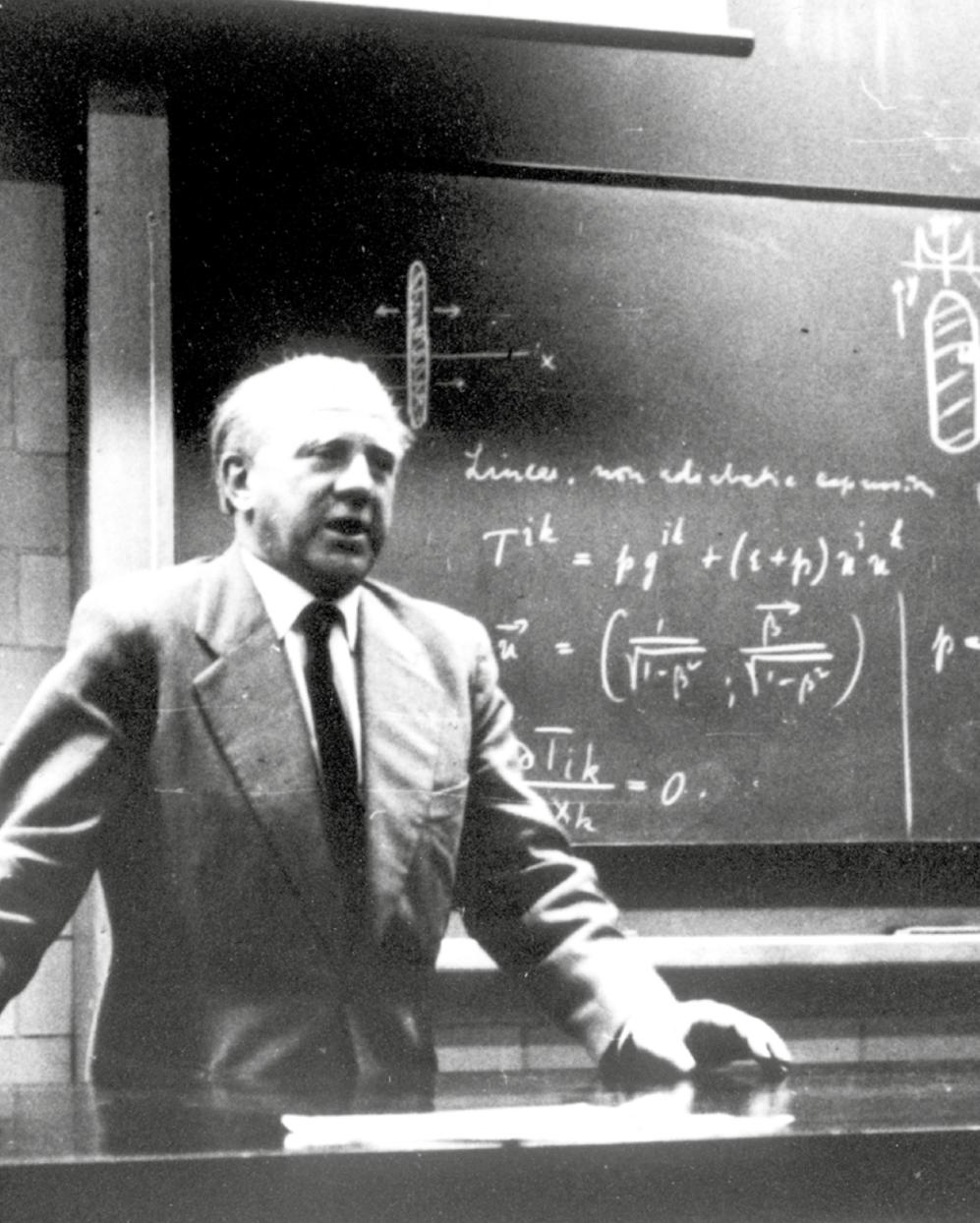
## El principio de indeterminación

A principios del siglo XX, la teoría atómica de Dalton y los estudios de Bohr sobre el átomo no podían explicar algunos de los fenómenos que se observaban como resultado de la aplicación de la física experimental. La determinación de la naturaleza dual de las partículas que llevó a cabo De Broglie y la formulación de la ecuación de onda realizada por Schrödinger constituyeron los primeros pasos de una nueva forma de estudiar el átomo y sus partículas constituyentes. Sin embargo, fue el principio de incertidumbre de Heisenberg el que supuso un gran avance en la manera de comprender el universo cuántico.

La dualidad onda-partícula establece que las ondas pueden comportarse como partículas, y viceversa. Heisenberg aseguraba que era imposible conocer con precisión y de manera simultánea pares de variables físicas como la posición y el movimiento lineal de una partícula. Cuanta más precisión se logra al determinar una de las dos variables, menos precisa es la otra, por lo que si se mide la longitud de onda se pierde la información sobre la posición exacta de la partícula y, si se decide conocer su ubicación precisa, se renuncia a conocer con la misma precisión la longitud de onda. ■



Heisenberg durante su estancia en Ginebra en 1958



Heisenberg en una de sus clases. Detrás de él se pueden ver sus cálculos

## Aplicaciones de la mecánica cuántica y el CERN

Tras convertirse en profesor de Física Teórica en la Universidad de Leipzig en 1927 y fundar allí un centro de física atómica, Heisenberg llevó a cabo una de las primeras aplicaciones de la mecánica cuántica al resolver el átomo de helio utilizando la ecuación de Schrödinger, el principio de exclusión de Pauli y la regla de Hund sobre el espín total. También participó en el desarrollo de varias teorías y continuó trabajando en el campo de la física cuántica.

Además, fue uno de los científicos que contribuyó a la creación del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) propuesto por Louis de Broglie y a su establecimiento en Ginebra. En 1952, la idea de crear un acelerador de partículas europeo congregó en Copenhague un gran número de científicos, entre los que se encontraba Heisenberg. Como delegado de Alemania, participó en las conversaciones de la UNESCO que llevaron a su establecimiento y se convirtió en el primer presidente del Comité de Política Científica del CERN. ■

por lo que en 1952 Heisenberg viajó a Washington y consiguió el permiso necesario para construir un pequeño reactor. Durante los años siguientes, continuó asistiendo a congresos y comenzó a trabajar en la teoría del campo unificado, que pretendía unificar las fuerzas de distinta naturaleza que rigen la dinámica de las partículas elementales. Para ello, estudió los resultados de los experimentos que se llevaban a cabo en los aceleradores de Ginebra y Brookhaven. Sin embargo, no llegó a terminar esta teoría.

Heisenberg murió en 1976 en Múnich y, en su honor, el Max Planck Institut für Physik, ampliado y modernizado bajo su dirección, adoptó la denominación adicional de «Werner Heisenberg Institut». Sus aportaciones abrieron nuevos campos de investigación y fueron tan importantes para el desarrollo de la ciencia que Heisenberg es recordado como uno de los físicos teóricos más destacados del siglo XX. ■

### Bibliografía

- Cassidy, D. (2009). *Beyond Uncertainty: Heisenberg, Quantum Physics, and The Bomb*. Nueva York, Bellevue Literary Press.
- González-Linares, M. (2016). Farm Hall: fisión en la granja [en línea]. [Consulta: 13/11/2024]. *Amberes revista cultural*. Disponible en: <https://amberesrevista.com/farm-hall/>
- Heisenberg, W. (1971). *Physics and beyond. Encounters and conversations* [Traducción al inglés de Pomerans, A. J.]. Nueva York, Harper & Row.
- Max Planck Institut Für Physik (2021). A brief history of modern physics [en línea]. [Consulta: 13/11/2024]. *Max Planck Institut Für Physik*. Disponible en: <https://www.mpp.mpg.de/en/about-us/history>
- Peralta, R (2019). Principio de incertidumbre de Heisenberg. *Revista C2 Ciencia y Cultura*.
- Rechenberg, H. (2001). Werner Heisenberg: the Columbus of quantum mechanics. *CERN Courier*.
- Ynduráin, F. J (2002). Fermi, Heisenberg y Lawrence. *Arbor*, 673, pp. 75-86.
- Ynduráin, F. J (2006). El «club del uranio» de Hitler y el programa atómico alemán en la Segunda Guerra Mundial. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España*, 100(1), pp. 105-111.



## El rover Perseverance reaviva la búsqueda de vida en Marte

**E**n un hallazgo que despierta enormes expectativas, el rover Perseverance de la NASA ha detectado posibles signos de vida pasada en Marte, lo que representa uno de los descubrimientos más complejos y sorprendentes hasta la fecha. La roca, apodada Cheyava Falls, presenta una intrigante morfología similar a una punta de flecha, y contiene firmas químicas y estructuras que podrían haberse formado mediante

procesos microbianos hace miles de millones de años.

El análisis preliminar revela la presencia de compuestos orgánicos y vetas de sulfato de calcio, lo cual sugiere que alguna vez fluyó agua por esta estructura, un componente clave para el desarrollo de vida. Asimismo, se hallaron pequeños anillos de color oscuro compuestos de hierro y fosfato, características

que en la Tierra suelen asociarse a actividad microbiana. David Flannery, astrobiólogo del equipo científico de Perseverance, considera estas estructuras como una sorpresa fascinante y explica que, en nuestro planeta, tales formaciones se relacionan con microbios fosilizados. Sin embargo, aunque los indicios son prometedoras, aún no se cuenta con pruebas concluyentes.

## Explorando el fondo marino: el oxígeno oscuro

**A**ndrew Sweetman, líder del grupo de investigación de Ecología y Biogeoquímica de los Fondos Marinos de la Asociación Escocesa de Ciencias Marinas (SAMS), ha hallado junto a su equipo lo que llaman «oxígeno oscuro» en profundidades oceánicas previamente consideradas inhóspitas para el oxígeno. Esta enigmática forma, hasta ahora desconocida, no sigue los patrones tradicionales de producción y transporte de oxígeno en el océano, como la fotosíntesis o la difusión desde la superficie.

El hallazgo plantea ciertos interrogantes sobre los procesos bioquímicos en zonas profundas y aisladas del océano, que podrían sostener formas de vida hasta ahora insospechadas. El descubrimiento plantea la existencia de mecanismos geológicos o químicos desconocidos que generan o liberan oxígeno en estas profundidades. Este avance podría revolucionar la comprensión de los ecosistemas marinos profundos, así como ofrecer nuevas pistas sobre la capacidad de la Tierra para sustentar vida en condiciones extremas.



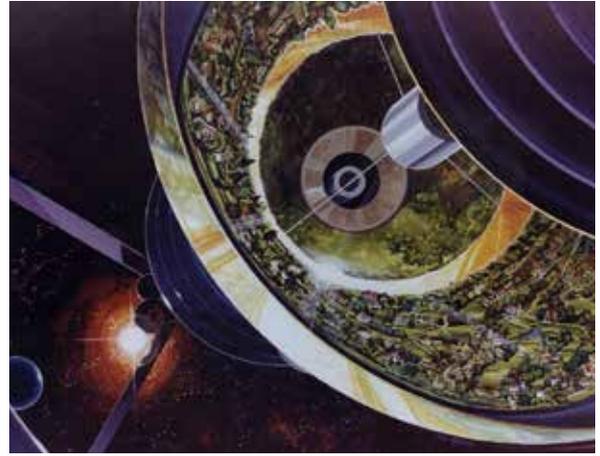


## EFEMÉRIDES

### Esfera de Bernal: cien años de visión y ciencia para colonizar el espacio

**E**n el año 1925, el científico Gerard K. O'Neill ideó la Esfera de Bernal como una estructura orbital perfecta destinada a albergar a la humanidad en el espacio, un refugio autónomo y capaz de crear las condiciones necesarias para la vida humana en un entorno gravitacionalmente estable. Con un diámetro de 1,6 km, esta esfera rotatoria se concibió para generar una fuerza gravitacional artificial a través de su rotación continua, simulando las condiciones de la Tierra y ofreciendo un entorno protegido frente a la radiación cósmica, gracias a un armazón exterior robusto y eficiente. Su interior se concibió como una réplica en miniatura de los ecosistemas terrestres, donde ríos, áreas boscosas y cultivos coexistieran en un ciclo cerrado de producción de oxígeno, reciclaje de agua y generación de alimentos.

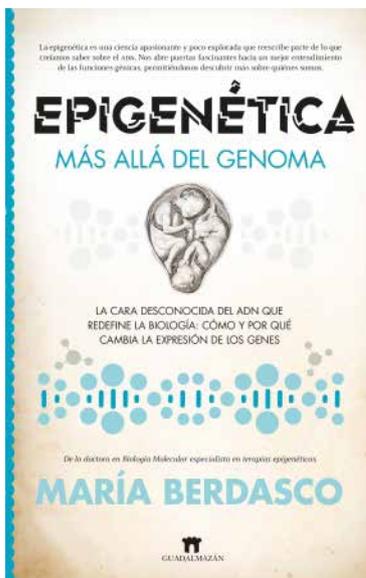
Los principios fundamentales de la Esfera de Bernal han inspirado a generaciones de científicos, permaneciendo como un pilar teórico en la concepción de colonias espaciales autosostenibles. No obstante, las dificultades inherentes al diseño de una estructura de tal magnitud siguen siendo sustanciales. La dependencia de recursos externos, la necesidad de protección frente a la radiación cósmica y los elevados costos asociados al transporte de materiales continúan siendo desafíos cruciales que limitan su materialización en el corto plazo.



A pesar de los avances tecnológicos en áreas como la generación de oxígeno y el reciclaje de recursos, la creación de un hábitat autosuficiente y de gran escala en el espacio sigue siendo una meta de investigación y desarrollo. Sin embargo, los estudios contemporáneos sobre hábitats espaciales están encaminados hacia versiones más compactas y eficientes de la Esfera de Bernal, lo que sugiere que, aunque esta visión siga siendo un ideal distante, los avances hacia la creación de entornos autosostenibles en el espacio profundo están avanzando con pasos firmes.



## LIBROS



**M**aría Berdasco, doctora en Biología Molecular y líder del grupo de investigación Terapias Epigenéticas, se adentra en una disciplina que redefine las bases de la genética. A través de un enfoque accesible pero riguroso, explora cómo, sin alterar la secuencia del ADN, los genes pueden ser modificados por factores externos como la dieta, el estrés o el ambiente, afectando no solo a los individuos, sino también a sus descendientes. Este campo de estudio desafía las concepciones tradicionales de la biología genética, revelando los mecanismos que subyacen en procesos como el envejecimiento, enfermedades como el cáncer o, incluso, la herencia de traumas. Además, la epigenética tiene el potencial de revolucionar la medicina al ofrecer nuevas estrategias para tratar diversas enfermedades. A través de experimentos innovadores, Berdasco destaca la flexibilidad del genoma y su capacidad de adaptarse a los cambios, proporcionando una perspectiva fascinante sobre cómo nuestra biología está constantemente modelada por el mundo que nos rodea.

Berdasco Menéndez, M. (2024)  
*EPIGENÉTICA, más allá del genoma*  
Editorial Guadalmazán, 432pp.



EN RED

## Premio Nobel de Química 2024



**D**avid Baker, Demis Hassabis y John M. Jumper han sido galardonados con el Premio Nobel de Química 2024 en reconocimiento a sus extraordinarias contribuciones en el ámbito de la predicción y diseño de proteínas, una tarea que ha desafiado a la ciencia durante más de cincuenta años. Se distinguió el trabajo de Baker en el diseño computacional de proteínas con nuevas funciones, destacando la creación de proteínas inéditas como la Top7. Por su parte, Hassabis y Jumper han sido premiados por su desarrollo de AlphaFold, un innovador modelo de inteligencia artificial capaz de predecir la estructura de las proteínas con una precisión de hasta el 90 %. Este logro subraya el profundo impacto de las tecnologías computacionales y la inteligencia artificial en la biología molecular, un campo con el potencial de transformar radicalmente la ciencia biomédica en las próximas décadas.

Más información: <https://alphafold.ebi.ac.uk/>



## España lidera la detección de moléculas interestelares

**E**l radiotelescopio de 40 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el Observatorio de Yebes (Guadalajara) se ha convertido en líder mundial en la detección de moléculas interestelares. Con noventa nuevas especies moleculares identificadas, lo que representa casi el 30 % de todas las detectadas en la historia de la radioastronomía, los astrónomos españoles han descubierto recientemente dos isómeros del cianoacenaftileno, moléculas triaromáticas que ofrecen nuevas perspectivas sobre los procesos químicos en las nubes interestelares. Este hallazgo refuerza la hipótesis sobre la formación de



compuestos orgánicos esenciales para la vida, lo que podría tener implicaciones para entender el origen de la vida en la Tierra y en otros lugares del universo. ■

Más información: <https://astronomia.ign.es/icts-yebes/servicios-radiotelescopio-40m>

| REACCIÓN EN CADENA |

## REDES



### @MinutePhysics

Canal centrado en la física, que ofrece explicaciones científicas acompañadas de animaciones dinámicas y, en ocasiones, de música o ritmo, para hacer más accesibles conceptos complejos. También explora aspectos técnicos sobre el funcionamiento de los instrumentos y el impacto de la música en el cerebro y la cultura.



### Música y ciencia

Este grupo explora la fascinante intersección entre la ciencia y la música, compartiendo artículos sobre el impacto de los acordes en el cerebro, así como experimentos científicos relacionados con el sonido. Se centra en investigaciones y curiosidades sobre cómo la música y el sonido influyen en nuestras emociones, cognición y bienestar.



### @mujerconciencia

Su enfoque principal es promover la inclusión de la mujer en la ciencia. La cuenta aborda diversas disciplinas, explorando la intersección entre la ciencia y el arte y poniendo en valor las contribuciones de las mujeres en estos campos.



### @marta.hallo

Con más de medio millón de seguidores en sus redes sociales, esta creadora se dedica a la divulgación científica y educativa. Abarca temas variados, desde física y astronomía hasta medicina e historia, indagando en todas las áreas que influyen en nuestro entorno. Con un enfoque dinámico, expone temas complejos de forma entretenida, acercando la ciencia a una audiencia amplia y curiosa.



### @crispinaymolina

Cuenta dirigida por dos creadoras de contenido que explican temas complejos y curiosos de ciencia de manera entretenida y accesible. Utilizan canciones con letras explicativas para desglosar conceptos científicos, haciendo que el aprendizaje sea divertido y fácil de comprender, especialmente para el público infantil.

## El CSN reafirma el alto nivel de la vigilancia radiológica ambiental durante su 29.ª jornada anual



La 29.ª Jornada de Vigilancia Radiológica Ambiental, centrada en los resultados de la campaña de intercomparación analítica de 2023 sobre muestras de alimentos, reunió a expertos en radioprotección para evaluar avances y mejorar metodologías de los laboratorios participantes. El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Juan Carlos Lentijo, destacó la importancia de estas campañas para garantizar la fiabilidad de los análisis radiológicos. Además, se presentó la reciente verificación de la Red de Vigilancia

Ambiental de Madrid por parte de la Comisión Europea, fortaleciendo los estándares nacionales.

La jornada abordó retos como la medición de radionucleidos beta débiles y preparó las bases para la campaña de 2025, enfocada en muestras de suelo. El CSN reafirmó su compromiso con la protección radiológica, apoyándose en la colaboración con instituciones científicas y universidades, para consolidar a España como referente internacional en vigilancia radiológica. ■

## Guía para la protonterapia global

España refuerza su posición como líder europeo en protonterapia, una de las técnicas radioterápicas más avanzadas para el tratamiento del cáncer, mediante una estrecha colaboración con el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO). Tras una serie de encuentros celebrados en la sede del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), se inició la elaboración de una guía conjunta para el licenciamiento e inspección de estas instalaciones, priorizando la seguridad radiológica y la excelencia técnica. Actualmente, España cuenta con dos unidades operativas, y el CSN proyecta licenciar diez más en siete comunidades autónomas, consolidándose como el país europeo con mayor acceso a esta innovadora terapia. El FORO, integrado por los principales organismos reguladores de la región, destacó la importancia de esta colaboración para afrontar los desafíos técnicos y reglamentarios, mientras que los asistentes visitaron una instalación en Pozuelo de Alarcón para conocer su funcionamiento y estándares de seguridad.

## La Inspección Residente del CSN: 40 años de vigilancia y seguridad nuclear en España

En 2024 se ha conmemorado el cuadragésimo aniversario de la Inspección Residente, unidad pionera en la supervisión directa y permanente de las instalaciones nucleares en España desde su creación en 1984. El equipo ha sido clave en la protección radiológica, la seguridad de las centrales nucleares y la confianza pública en la gestión de la energía nuclear. En un acto presidido por Juan Carlos Lentijo, quien destacó la relevancia de esta unidad como «pilar esencial de la labor de supervisión», se reconoció su contribución a la seguridad nacional y al fortalecimiento de una cultura de transparencia. Por su parte, Teresa Vázquez, directora técnica de Seguridad Nuclear, subrayó la evolución de la Inspección Residente ante los avances tecnológicos y las demandas sociales crecientes en materia de seguridad y claridad informativa. La jornada incluyó una mesa redonda con expertos que analizaron la trayectoria de la unidad y compartieron anécdotas que ilustran la supervisión diaria, la implementación de planes de emergencia y la verifica-



ción del cumplimiento normativo. Además, se reafirmó el compromiso del CSN con la publicación de informes regulares y auditorías independientes que garantizan la accesibilidad de la información a la ciudadanía. ■

## Encuentro bilateral para fortalecer la protección radiológica



**E**l Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de España y la Inspección Federal de Seguridad Nuclear (ENSI) de Suiza celebraron un encuentro técnico bilateral destinado a fomentar el intercambio de conocimientos y buenas prácticas en protección radiológica y gestión de residuos nucleares. Las sesiones, desarrolladas entre los días 13 y 14 de noviembre, abordaron aspectos clave tanto de la operación como del desmantelamiento de centrales nucleares. Uno de los momentos destacados fue la visita técnica a la central nuclear Cofrentes, que comparte características con la suiza Leibstadt. Ambas cuentan con el mismo tipo reactores y comenzaron su operatividad en 1984. Respon-

sables de Cofrentes presentaron su plan director para la reducción de dosis ocupacionales y la gestión de residuos radiactivos, además de mostrar las instalaciones de almacenamiento.

Por otro lado, en la sede del CSN en Madrid, se presentaron avances en protección radiológica ocupacional, incluyendo un balance del periodo 2012-2022 y experiencias del proyecto de desmantelamiento de la central Santa María de Garoña. El encuentro bilateral se enmarca en el Memorando de Entendimiento, firmado entre el CSN y ENSI en junio de 2024, que establece un compromiso de colaboración indefinido en materia de seguridad nuclear y uso pacífico de la energía atómica. ■



## Simulacro de emergencia en la central nuclear Trillo

**Ejercicio inédito por su escala y alcance, diseñado para evaluar la capacidad de respuesta ante un hipotético escape radiactivo en la central nuclear Trillo.**

**E**n el marco del Plan Estatal General de Emergencias de Protección Civil (PLEGEM), el simulacro NURIEX GU 2024 movilizó a más de 360 personas. Coordinado por la Subdelegación del Gobierno en Guadalajara, simuló la evacuación de un centenar de personas, así como operaciones de descontaminación y atención médica avanzadas. Además, se puso en marcha el sistema de alerta temprana, enviando notificaciones a más de 6400 residentes de los municipios cercanos, y se activaron protocolos de comunicación alternativos frente a la supuesta caída de las redes habituales. El simulacro permitió al CSN evaluar el Plan de Emergencia Nuclear de Guadalajara, reforzando la seguridad poblacional y ambiental, y afianzando la preparación ante emergencias nucleares futuras. ■

>>> **ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN**

### Nuevo almacén temporal individualizado de la central nuclear Vandellós II

**E**l Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha autorizado el montaje de un almacén temporal de combustible gastado en la central nuclear Vandellós II, que tendrá capacidad para 73 contenedores. También llevará a cabo una modificación en el Plan de emergencia de Ascó para incluir el tratamiento de mujeres embarazadas o lactantes en emergencias nucleares. Adicionalmente, ha formalizado un convenio con la Universitat Politècnica de València para la actualización de metodologías en seguridad nuclear y ha prorrogado su colaboración con la Generalitat de Cataluña en la gestión de emergencias radiológicas. ■

### Informe preceptivo al proyecto de Orden Ministerial sobre medicina nuclear

**E**l Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear emitió el informe preceptivo sobre el proyecto de Orden Ministerial que aprueba el programa formativo en medicina nuclear, destacando la actualización de los criterios de evaluación para especialistas en formación y los requisitos de acreditación de unidades docentes.

El CSN prosigue con los preparativos para la misión de seguimiento del Sistema Integrado de Revisión Reguladora del Organismo Internacional de Energía Atómica, y ha aprobado una modificación en el Plan de Emergencia Interior de la central nuclear Almaraz. ■



# ÚLTIMAS PUBLICACIONES

## Carné Radiológico digital

Para facilitar a las empresas los procesos de emisión y gestión de estos carnés radiológicos digitales, el CSN ha desarrollado una exposición gráfica que puede consultarse en <https://www.csn.es/proteccion-radiologica/carnes-radiologicos-empresas-externas>



**Protección de las trabajadoras gestantes expuestas a radiaciones ionizantes en el ámbito sanitario / CSN**

**Catálogo de publicaciones**

**CSN**

CONSULTA EL CATÁLOGO DE PUBLICACIONES DEL CSN.  
Disponible en:



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: 913460558 / [peticiones@csn.es](mailto:peticiones@csn.es)  
También puede suscribirse a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario [online](http://run.gov.es/xdjxkd) [http://run.gov.es/xdjxkd]

La información facilitada 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.

## ON THE COVER

### 6 > The key lies on neutrons

The discovery of neutrons in 1932 by British Nobel laureate James Chadwick was a major milestone in modern physics and in our understanding of the structure of the atom. Since then, research about neutrons has become a fascinating challenge

## REPORTS

### 14 > The road to fusion energy continues

Challenges of the Thermonuclear Experimental Reactor, developed in Cadarache, in the south of France, with the collaboration of 33 countries

### 20 > Guardians of safety

The Resident Inspection, a permanent supervisory unit at nuclear power plants in Spain, is celebrating the 40th anniversary of its creation

## INTERVIEW

### 26 > José Luis Navarro, Chairman of Enresa

“The nuclear decommissioning schedule is a challenge for the entire sector, starting with the CSN itself and continuing with the Spanish companies”.

## TECHNICAL ARTICLES

### 30 > CSN/UPM GO-MERES Project on GOTHIC simulation of the behaviour of hydrogen in containment with sprinklers and suppression pools

### 39 > Regulatory experience in the decommissioning of nuclear power plants

## SCIENCE AND MUSIC

### 46 > Of waves and notes

An inseparable duo that acts as an instrument for understanding the universe and its laws, while touching the depths of the human spirit with its beauty

## RADIOGRAPHY

### 52 > PWR and BWR fuel elements

Main differences between the elements of the two types of nuclear plant

## CSN I+D

### 54 > Radon exhalation in building materials: radiological impact and corrective measures (EXradón)

Scope and objectives

## ENTITIES

### 56 > Institute of Nuclear Fusion Guillermo Velarde

European benchmark in Inertial Confinement Fusion (ICF)

## NAMES IN SCIENCE

### 60 > Werner Heisenberg and the beginning of quantum mechanics

Creator of the uncertainty principle and the mathematical foundations of quantum mechanics, he is one of the 20th century's greatest theoretical physicists



## **TRABAJA CON NOSOTROS**

**El CSN convoca nuevas plazas  
para el cuerpo de Seguridad Nuclear  
y Protección Radiológica**



Más información en [www.csn.es](http://www.csn.es)