CSN
ALFA
Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 65
Marzo 2026



# Tecnología láser de alta intensidad: nuevas capacidades para la industria nuclear

La fosa atlántica. Evaluación del estado de los residuos radiactivos en el océano

Ciudades inteligentes. Tecnología, energía y gobernanza para un nuevo modelo urbano

Entrevista a Jaime Domínguez Abascal, Presidente de la Real Academia de Ingeniería



# I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear

Periodo 2023-2026

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

En ste número de *Alfa* convergen innovación tecnológica, análisis regulatorio y memoria ambiental dentro del ámbito nuclear. La portada está dedicada a la tecnología láser de alta intensidad y a sus principales aplicaciones, desde la producción de radioisótopos para diagnóstico médico hasta el desarrollo de sistemas de dosimetría adaptados a pulsos ultracortos, sin olvidar su utilidad en el análisis de materiales, la descontaminación de instalaciones y la investigación en fusión. En conjunto, el número propone un recorrido por cuestiones que conectan avances recientes en ciencia y tecnología con algunos de los desafíos institucionales, ambientales y de seguridad que siguen marcando su evolución.

De estas nuevas capacidades experimentales, el número pasa a una cuestión marcada por la persistencia de decisiones adoptadas hace décadas. El reportaje dedicado a la fosa atlántica revisa el problema de los residuos radiactivos depositados en el océano y se detiene en la campaña científica emprendida para localizarlos, evaluar su estado y estudiar el comportamiento de los radionucleidos en el ecosistema profundo. El seguimiento de estos materiales enlaza historia, vigilancia radiológica y conocimiento del medio marino, y pone de relieve la necesidad de disponer de datos sólidos para comprender un legado ambiental especialmente complejo.

También el entorno urbano aparece en estas páginas como un ámbito de transformación técnica e institucional. El análisis sobre ciudades inteligentes aborda un modelo en el que convergen tecnología, energía y gobernanza, y en el que la digitalización deja de entenderse como un fin en sí mismo para pasar a ser una herramienta de planificación, gestión y evaluación. Sensores, plataformas de datos, gemelos digitales, eficiencia energética y ciberseguridad forman parte de un escenario en el que la calidad de la información y la capacidad institucional para convertirla en decisiones verificables resultan tan relevantes como la propia infraestructura tecnológica.

La entrevista a Jaime Domínguez Abascal aporta, desde la experiencia académica y de gestión científica, una reflexión sobre la evolución de la ingeniería, la transferencia de conocimiento y la necesidad de reforzar las capacidades europeas en ámbitos estratégicos. Su planteamiento subraya una idea de fondo que atraviesa buena parte de este número: la innovación exige continuidad, estructuras sólidas y una conexión efectiva entre investigación, industria y servicio público.

Esa relación entre desarrollo tecnológico y exigencia institucional está también presente en el artículo técnico dedicado a los reactores modulares pequeños. A partir de la experiencia acumulada en distintos países, el texto examina algunos de los principales aspectos regulatorios asociados a los SMR, desde los procesos de licenciamiento hasta cuestiones como el término fuente, los nuevos combustibles o la adaptación de determinados criterios de seguridad. El posible despliegue de estas tecnologías dependerá, en buena medida, de la capacidad de los marcos reguladores para evaluarlas con rigor y dar respuesta a diseños cada vez más diversos.

La presencia de la ciencia en la cultura y en el imaginario colectivo tiene asimismo su lugar en este número. La sección *Ciencia y superhéroes* propone en esta ocasión un recorrido por el siglo XX para mostrar cómo la radiactividad, la genética, la energía nuclear y la física teórica alimentaron buena parte de los relatos heroicos de la cultura popular. Más allá de su dimensión divulgativa, el reportaje muestra cómo determinados avances científicos han sido reinterpretados socialmente y convertidos con frecuencia en símbolos de poder, riesgo o transformación.

Esa perspectiva histórica se prolonga en *Ciencia con Nombre Propio*, dedicada a Enrico Fermi, figura decisiva de la física del siglo pasado. Su trayectoria científica, marcada por la claridad conceptual y una notable capacidad para abordar problemas complejos desde planteamientos sencillos, sigue siendo referencia fundamental para entender algunos de los desarrollos más influyentes de la física nuclear contemporánea.


ALFA

**Revista de seguridad nuclear y protección radiológica**
Editada por el CSN

**Número 65**
**Marzo 2026**

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445



**Comité Editorial**
Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Silvia Calzón Fernández
Teresa Vázquez Mateos
Isabel Villanueva Delgado
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Manuel Luis 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 I. 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, BSC, CEFCA, CNA, Envato, Freepik, istockphoto

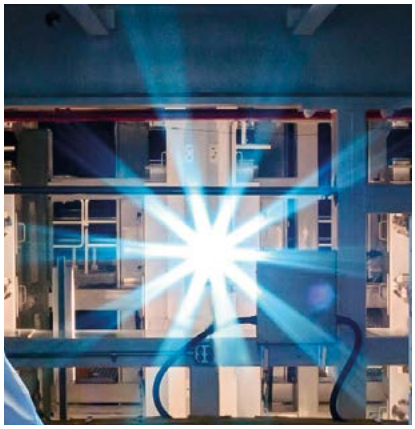
**Producción e impresión**
Editorial MIC
Pol. Ind. Trobajo del Camino
24010 León

D.L.: M-24946-2012
ISSN-1888-8925



© Consejo de Seguridad Nuclear

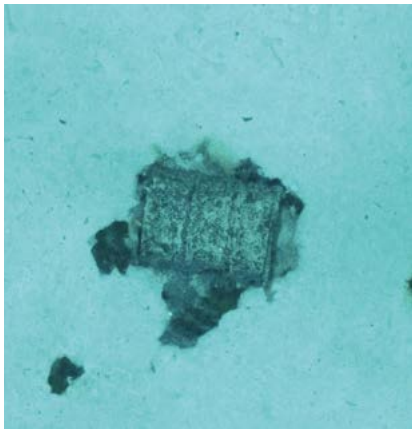
Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista *Alfa* las comparta necesariamente.



## EN PORTADA


6 **Tecnología láser de alta intensidad: nuevas capacidades para la industria nuclear**

Los láseres se sitúan hoy en el centro de algunas de las investigaciones más avanzadas en física aplicada, con nuevas posibilidades en producción de radioisótopos, dosimetría, análisis de materiales, descontaminación e investigación en fusión

## REPORTAJES


14 **La fosa atlántica. Evaluación del estado de los residuos radiactivos en el océano**

Entre los años cincuenta y noventa, varios países europeos depositaron en la fosa atlántica unos doscientos mil bidones de residuos radiactivos. Una nueva campaña científica trata de localizarlos, evaluar su estado y el comportamiento de los radionucleidos en el ecosistema profundo

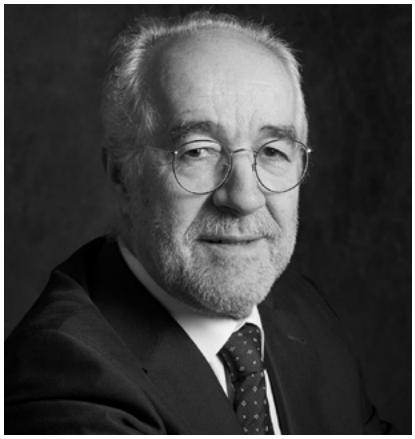




22 **Ciudades inteligentes. Tecnología, energía y gobernanza para un nuevo modelo urbano**

La urbanización, la transición energética y la digitalización sitúan a las ciudades en el centro de nuevas formas de planificación y gestión


## ENTREVISTA




30 **Jaime Domínguez Abascal**

Catedrático de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Sevilla y presidente de la Real Academia de Ingeniería


## ARTÍCULOS TÉCNICOS


35 **Aspectos reguladores de los reactores modulares pequeños (SMR)**

## CIENCIA Y SUPERHÉROES

44 **De la radiactividad a la genética, a través del imaginario heroico del siglo XX**

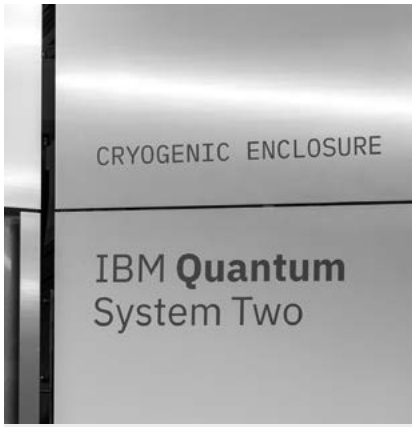
La radiactividad, la energía nuclear, la genética y la física teórica alimentaron parte del imaginario de los superhéroes, donde la ciencia aparece como poder, riesgo y transformación




## RADIOGRAFÍA

50 **Proyecto Meyer**

Protocolo Nacional para la medida y evaluación de dosis de I-131 en población expuesta (adultos y niños) en situaciones de emergencia




## CSN I+D

52 **Mejoras en las nuevas técnicas de inteligencia artificial para la detección de anomalías en reactores nucleares (INAIA)**

## ENTIDADES

54 **IBM Quantum System Two**

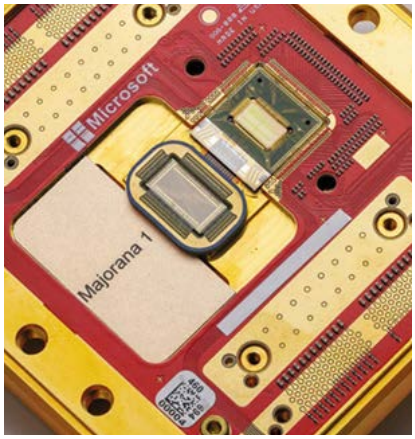
El primer IBM Quantum System Two operativo en Europa refuerza la apuesta vasca por la computación cuántica como infraestructura científica



## CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

60 **Enrico Fermi, la elegancia de la sencillez**

Figura esencial de la física del siglo XX, desde sus contribuciones a la física nuclear hasta la primera reacción en cadena autosostenida




65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**



# Tecnología láser de alta intensidad:

## nuevas capacidades para la industria nuclear

**Desde la producción de radioisótopos para diagnóstico médico hasta el desarrollo de nuevos sistemas de dosimetría adaptados a pulsos ultracortos, los láseres se sitúan en la actualidad en el centro de algunas de las investigaciones más avanzadas en física aplicada.**

Texto: **Isabel Alonso**

Cuando Theodore Maiman encendió en 1960 el primer láser operativo –utilizando un cristal de rubí y una lámpara de xenón– difícilmente podía imaginarse la magnitud que alcanzaría aquella nueva tecnología. Concebidos de forma teórica por Albert Einstein en 1916, al plantear la posibilidad de que un fotón pudiera inducir la emisión de otro fotón idéntico a partir de un átomo excitado, la idea de desarrollarlos comenzó a tomar fuerza a partir de la Segunda Guerra Mundial. Primero dio lugar al máser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), cuando en 1954 Charles H. Townes y James Gordon aplicaron este principio a las microondas y, pocos años después, abrió el camino para la creación del láser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Tras el de Maiman, apare-



*Instalaciones para la amplificación de los pulsos láser, en la National Ignition Facility (EE. UU.). Damien Jemison*

cieron otros basados en helio-neón, neodimio, uranio y los primeros láseres semiconductores de arseniuro de galio. A partir de los primeros años de la década de los sesenta, el láser ya había dejado de ser una curiosidad científica para convertirse en una plataforma tecnológica en rápido crecimiento que se aplicaba en medicina (la primera vez que se utilizó un láser para tratar el desprendimiento de retina fue en 1961, en Nueva York), comunicaciones (en 1966 ya se propuso un modelo de fibra óptica y, en 1980, empezó a plantearse la creación de un cable de fibra óptica trasatlántico), comercio (en 1974 se utilizó por primera vez un escáner láser en un supermercado) e incluso ocio (el primer prototipo de reproductor de CD apareció en 1979, de la mano de Philips).

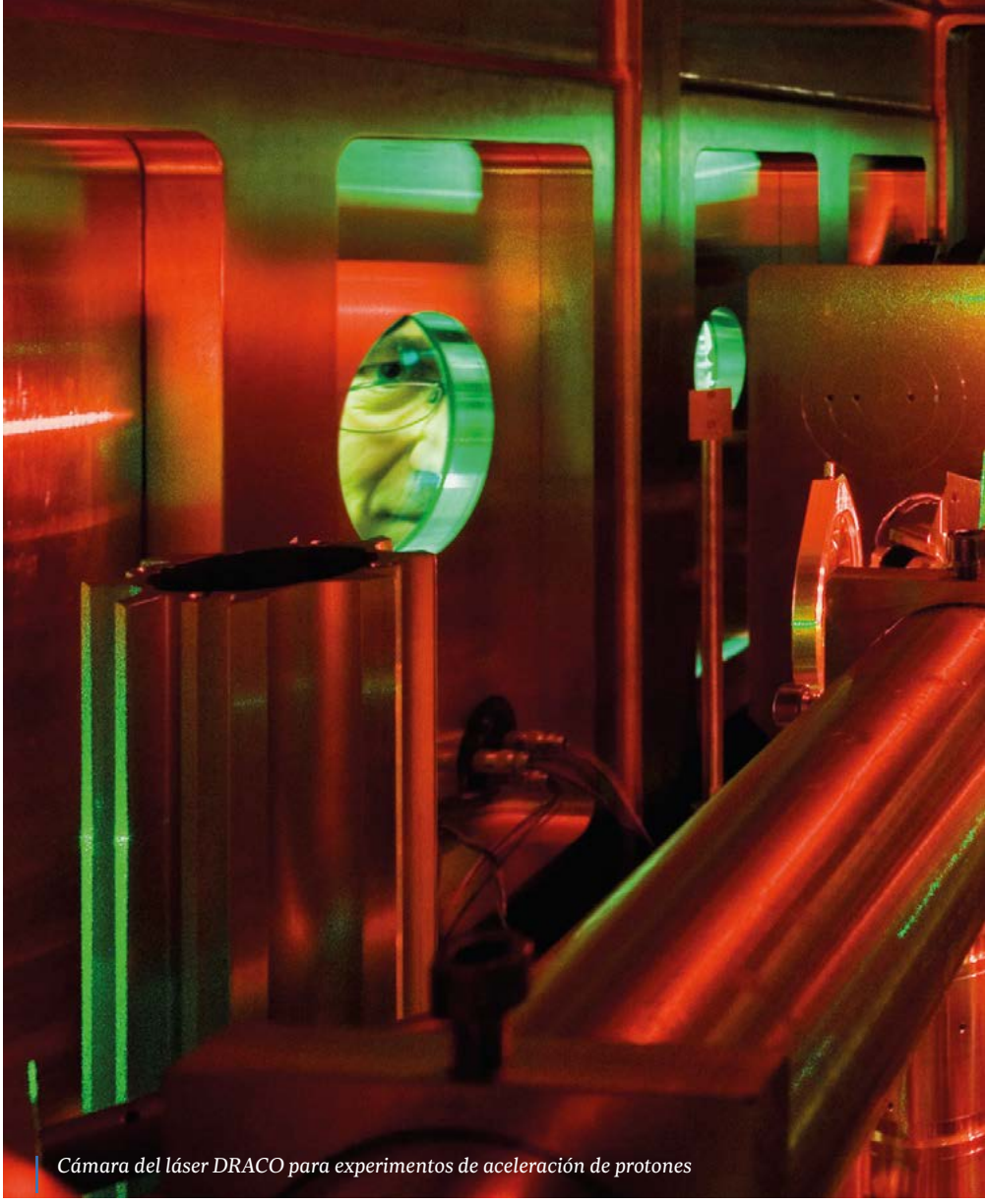
Con el tiempo, los láseres también empezaron a usarse en la industria para cortar, soldar, alinear o inspeccionar componentes con una precisión imposible de alcanzar con herramientas convencionales. En el



## Aplicaciones en instalaciones nucleares

El láser posibilita muchas operaciones de mantenimiento, descontaminación y desmantelamiento en instalaciones nucleares. Entre sus ventajas, cabe señalar la de permitir procesos precisos y controlados con una mínima generación de residuos, así como la posibilidad de operar de manera remota –con láseres montados en brazos robotizados– en geometrías complejas que no serían accesibles de otra forma. Y entre sus usos principales, destaca la ablación láser, utilizada para retirar capas superficiales contaminadas de metales y hormigones, sin emplear abrasivos ni productos químicos, evitar mezclas de residuos peligrosos y reducir la dispersión de partículas.

Los láseres son también fundamentales para el corte y la soldadura de precisión en entornos radiactivos, ya que reducen significativamente la exposición de los trabajadores.



*Cámara del láser DRACO para experimentos de aceleración de protones*

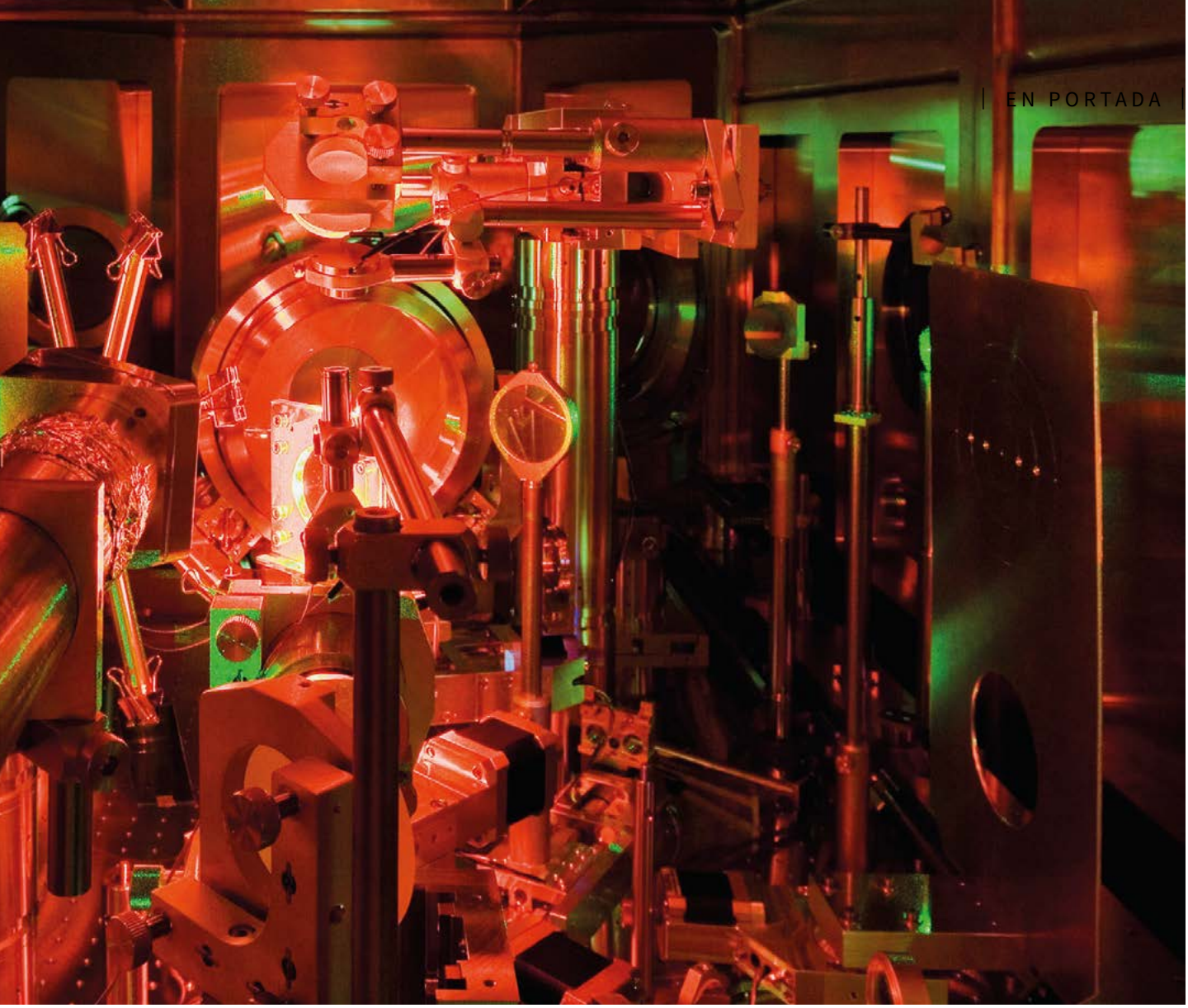
ámbito nuclear, no solo comenzaron a utilizarse como instrumento de medición, sino también como herramienta para la descontaminación, el desmantelamiento de instalaciones y la generación de plasmas de alta intensidad, neutrones pulsados o condiciones extremas comparables a las de ciertos procesos nucleares.

Además, la tecnología láser ha evolucionado hasta permitir controlar con gran precisión los elementos que determinan su funcionamiento: la duración del pulso, que puede variar desde escalas de milisegundos hasta los femtosegundos (milbillonésima parte de un segundo); la intensidad, que en los láseres más potentes alcanza valores muy elevados, y la longitud de onda, que puede ajustarse. Estos parámetros se combinan para producir un haz de luz direccional y coherente, que tiene la capacidad de generar pulsos muy cortos y con propiedades ópticas estables, lo que, con el tiempo, ha abierto nuevas vías experimentales en campos como la ciencia nuclear.

### Láseres y ciencia nuclear

El uso de láseres de ultra alta intensidad en experimentos vinculados a la ciencia nuclear ha experimentado un gran avance en los últimos años. En España, el Centro de Láseres Pulsados (CLPU) de Salamanca cuenta con el láser VEGA3, único del país que puede alcanzar una potencia de hasta un petavatio (mil billones de vatios).

Recientemente, este láser ha sido empleado en un experimento que logró producir $^{11}C$, radionúclido muy utilizado en tomografía por emisión de positrones (PET). Para



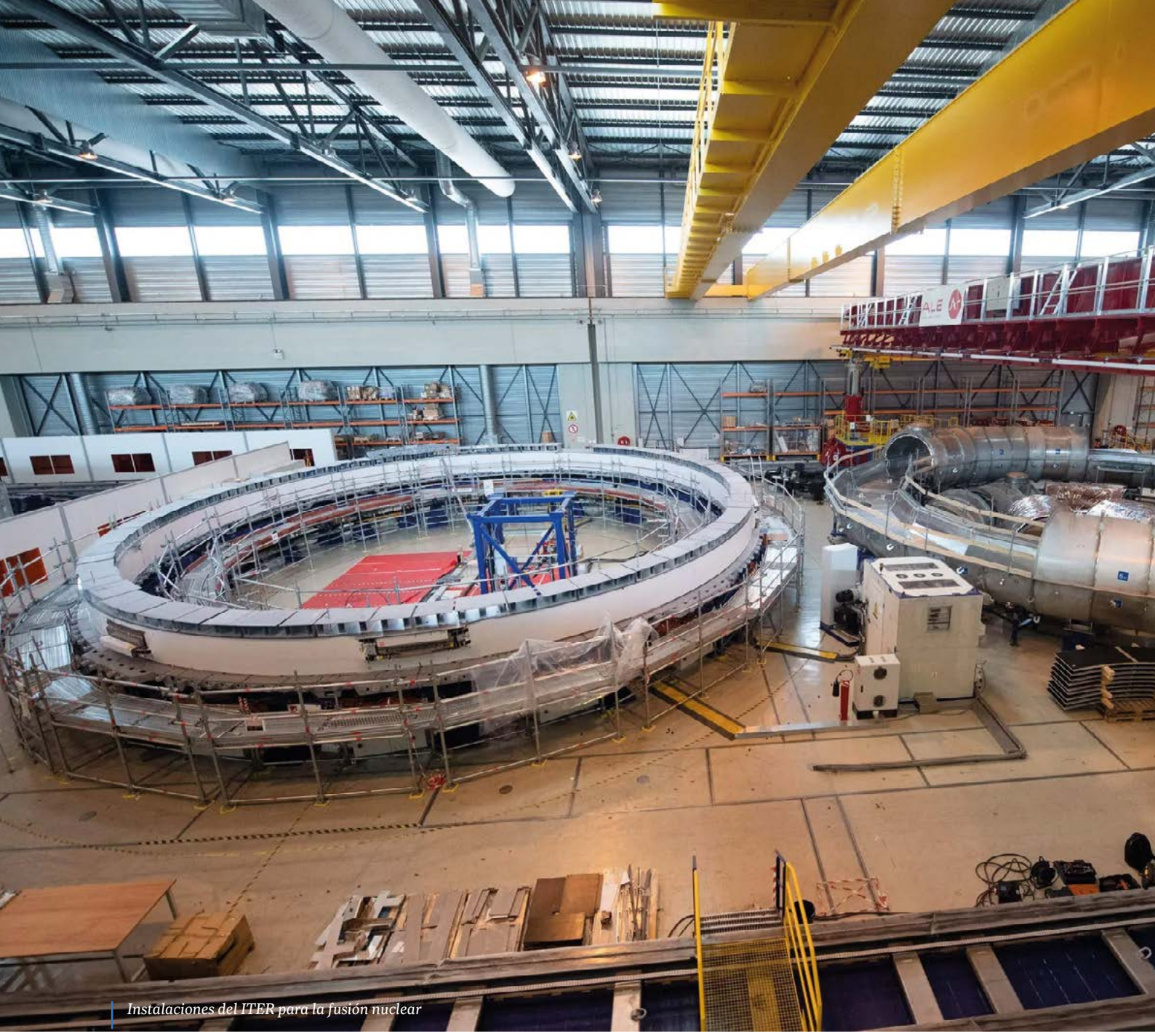
## CLPU de Salamanca

El Centro de Láseres Pulsados (CLPU), ubicado en el parque científico de la Universidad de Salamanca, es una infraestructura científico-tecnológica singular (ICTS) creada en 2007. En sus instalaciones se encuentra VEGA, láser avanzado que posee un sistema de doble CPA basado en cristales amplificadores de tecnología de titanio-zafiro y uno de los cuatro láseres de este tipo en Europa. Compuesto por tres módulos –VEGA-1, VEGA-2 y VEGA-3– sincronizados por un mismo generador de pulsos, puede alcanzar intensidades en el rango de $10^{19}$ $Wcm^{-2}$ y pulsos que van desde los 25 a 30 femtosegundos a alta tasa de repetición. Gracias a fondos europeos, se está llevando a cabo una ampliación que ayudará a orientar las capacidades de VEGA más allá de la investigación básica, hacia la energía, la biomedicina, la fusión nuclear e incluso hacia el ámbito de la defensa




ello, se aceleraron protones mediante el propio láser y se realizaron irradiaciones en régimen multidisparo, con frecuencias de repetición comprendidas entre 0,1 y 1 Hz.

El experimento demostró que VEGA3 puede comportarse como fuente estable de protones. De hecho, en una de las campañas más largas –compuesta por 174 disparos consecutivos hacia un blanco de boro de alta pureza y 2 mm de espesor– la energía máxima de los protones permaneció constante, con variaciones inferiores al 10 %. Los resultados confirmaron que la producción de $^{11}C$ era repetitiva y cuantificable, es decir, podría ser viable emplear fuentes láser-plasma para la producción controlada de radioisótopos, uno de los aspectos que se consideraban limitantes frente a los aceleradores convencionales en la ciencia nuclear experimental.



*Instalaciones del ITER para la fusión nuclear*

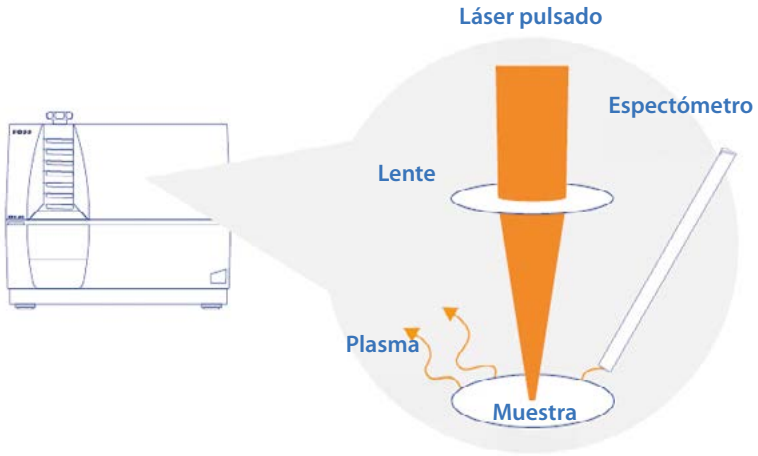
Del mismo modo, los láseres de alta intensidad pueden generar campos de neutrones. Un ejemplo destacado es el experimento desarrollado en el láser DRACO PW, del Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), que demuestra, por primera vez, la posibilidad de realizar espectroscopía de neutrones con resolución de evento individual, utilizando una fuente de neutrones generada íntegramente por un láser de clase petavatio. En este estudio, el láser DRACO produjo pulsos de 30 femtosegundos con energías de hasta 18 julios que, al incidir sobre láminas ultrafinas, generaron haces de protones y iones acelerados. La energía de estos protones es suficiente para inducir reacciones nucleares al impactar sobre un segundo material. Además, también se analizó la relación entre resolución energética y longitud del trayecto del neutrón, y se llegó a la conclusión de que los láseres de petavatio podrían servir para diseñar nuevas fuentes compactas de neutrones para laboratorio.

Sin embargo, los láseres de alta intensidad también plantean retos, por ejemplo, cómo medir la radiación que producen. Los detectores convencionales, diseñados para campos estables o de baja intensidad, funcionan correctamente en entornos industriales, pero, cuando los neutrones llegan en pulsos muy breves e intensos, pueden aparecer efectos de saturación, tiempos muertos significativos o desviaciones en la respuesta del detector.

Para solventarlo, el proyecto LINrem ha desarrollado dos dosímetros, LINrem y LINremext, que registran la carga total depositada por cada estallido de neutrones y permiten reducir los efectos de saturación y las pérdidas asociadas al solapamiento



## LIBS: análisis de materiales radiactivos




La espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS-*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) es una técnica que permite analizar la composición elemental de un material mediante un único pulso láser. Cuando el haz –un láser pulsado de alta energía– impacta sobre la superficie, genera un plasma que emite luz en diferentes longitudes de onda según el material que lo compone, de modo que cada elemento deja su «huella espectral». Una de las grandes ventajas de LIBS es que puede utilizarse a distancia, sin necesidad de preparar la muestra, y sobre sólidos, líquidos o gases, lo que la convierte en una herramienta especialmente valiosa para examinar materiales radiactivos. Por ello, la tecnología LIBS se utiliza para analizar componentes en reactores de fisión o combustibles basados en uranio y torio, así como para estudiar materiales expuestos a la radiación.

de eventos, algo esencial cuando se trabaja con láseres pulsados. LINrem, destinado a usos generales en laboratorios y plantas nucleares, pesa menos de 4 kg y es sensible a neutrones de hasta los 10 MeV; mientras que LINremext, pensado para entornos de altas energías, amplía el rango hasta los 10 GeV. En los experimentos llevados a cabo –uno de ellos en el CLPU– se observó una respuesta lineal para valores de dosis por pulso superiores a los 10 nSv (nanosievert o milmillonésima de sievert) por estallido, rango que constituye el límite operativo de muchas soluciones comerciales disponibles en la actualidad. Por ello, el desarrollo de estos dosímetros supone un avance no solo en la capacidad de medir con fiabilidad los pulsos de neutrones generados por láseres de alta intensidad, sino también en la seguridad de los operarios que los manejan al calcular mejor su tasa de exposición.

### Tecnología para la fusión nuclear

Desde hace décadas, los láseres de alta potencia son una de las vías exploradas para alcanzar uno de los mayores retos científicos y energéticos del siglo XXI: la fusión nuclear controlada. Según un reciente análisis del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la fusión se ve cada vez más impulsada por avances técnicos, la llegada de nuevos actores industriales y un incremento de la inversión privada, que en 2025 ya superaba los diez mil millones de dólares a escala global.

Para lograrla, se trabaja desde dos grandes enfoques: el confinamiento magnético, en el que se centra el ITER, y el confinamiento inercial, que utiliza láseres para comprimir y calentar las cápsulas esféricas



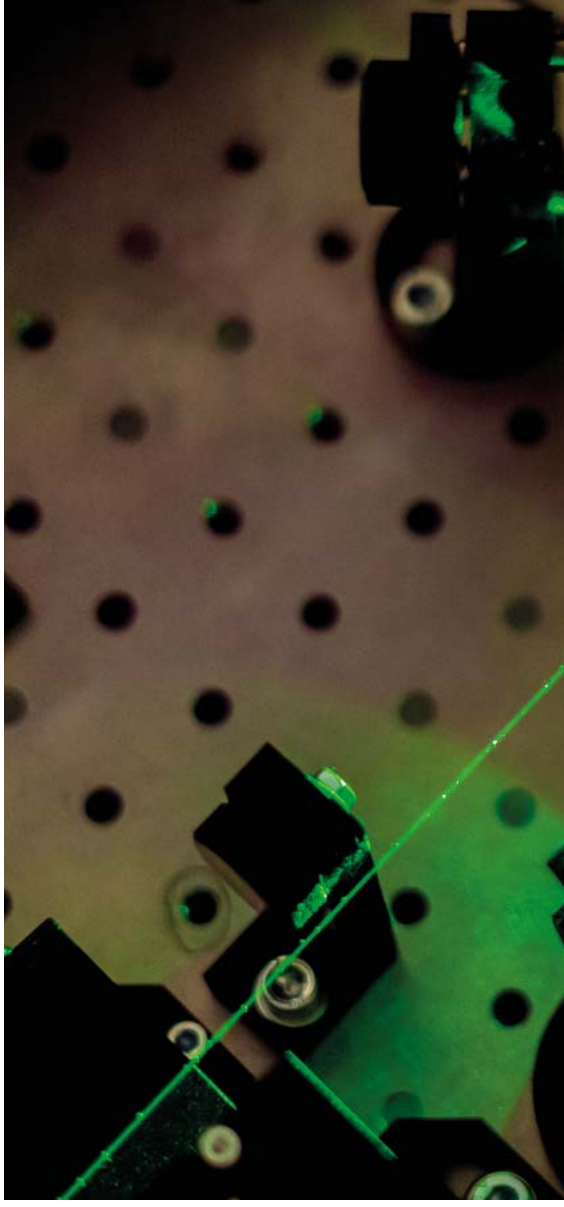
## Detección de incendios

Los láseres desempeñan un papel fundamental en la seguridad de las centrales nucleares, en concreto, en la detección temprana de incendios. Los dispositivos de detección basados en láser son capaces de detectar las partículas gracias a los principios de dispersión y atenuación de la luz. Para ello, un haz láser de intensidad estable se proyecta dentro de una cámara óptica interna. Cuando el aire no contiene partículas de humo, el fotodetector recibe un nivel luminoso constante; sin embargo, si las hay, la luz se dispersa y la señal se atenúa, tal y como ocurre en los dispositivos que utilizan luz infrarroja. Esta tecnología ya permite detectar incluso el humo frío, que se produce en las primeras fases de los incendios cuando aún no hay llama visible, por lo que es apta para lugares como armarios eléctricos y otras instalaciones críticas.

donde se contienen las pastillas de combustible compuestas por isótopos del hidrógeno, como el deuterio y el tritio, que se combinan a cien millones de grados Celsius para formar núcleos de helio y liberar neutrones. Como indica la OIEA[1], «la elevada temperatura a la que se somete la superficie de la cápsula provoca la microimplosión del combustible y, como resultado, la capa superficial de la pastilla se destruye y explota. La inercia creada por este proceso mantiene el combustible confinado durante un lapso lo suficientemente prolongado como para que se produzcan reacciones de fusión», de modo que se libere cuatro veces más energía de la aportada en un principio. No obstante, uno de los combustibles, el tritio, «es radiactivo y no se encuentra de forma natural en cantidades significativas, sino que hay que producirlo a partir de una reacción nuclear entre los neutrones generados en la fusión y el litio que rodea la pared del reactor».

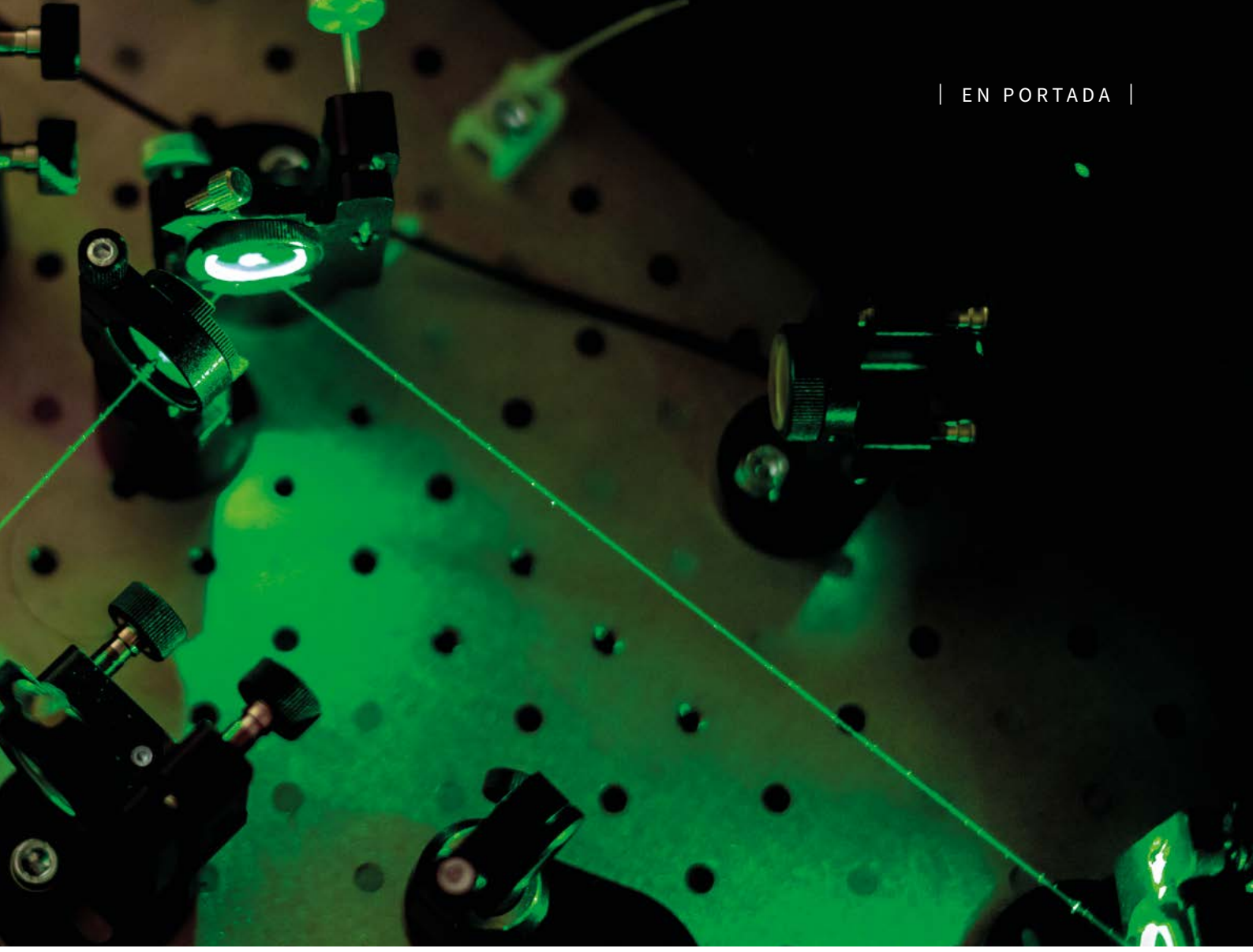
En 2022, en la National Ignition Facility (NIF), en Estados Unidos, se logró por primera vez una ganancia energética al obtener más energía procedente de las reacciones de fusión, que la depositada directamente por los láseres sobre el combustible. Esto confirmó que es posible alcanzar las condiciones requeridas para iniciar la fusión termonuclear mediante compresión láser, a pesar de los desafíos que supone. Para que la fusión resulte comercialmente viable, la presión en el punto caliente central del combustible debe alcanzar valores varios miles de millones de veces superiores a la presión atmosférica, lo que asimismo requiere una repetibilidad muy superior a la que se puede lograr en la actualidad.

En paralelo a los avances científicos, el OIEA ha reforzado su coordinación internacional en este ámbito mediante nuevos proyectos coordinados de investigación (Coordinated Research Projects, CRP), como la iniciativa *Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development*, que aborda cuestiones centradas en los materiales estructurales, la resistencia a flujos intensos de neutrones, la gestión del calor y el diseño de cámaras de reacción capaces de soportar ciclos repetidos de microexplosiones termonucleares.



Uno de los aspectos centrales en estos estudios es el comportamiento de los materiales sometidos a campos de neutrones rápidos generados en la reacción deuterio-tritio. El neutrón de 14 MeV producido en cada evento de fusión transfiere energía a las estructuras circundantes, induciendo desplazamientos atómicos, activación y degradación mecánica progresiva. Por ello, la investigación actual incluye el desarrollo de nuevos aceros de baja activación, materiales compuestos avanzados y diversas soluciones de blindaje, aunque también otras formas de lograr la fusión, basadas en la física cuántica, tal como se publi-

1 Véase Peeva, A. (2021). Alternativas al confinamiento magnético. *Energía de Fusión*, 62(2). OIEA. Disponible en: https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/alternativas-al-confinamiento-magnetico



có el 20 de enero en *Nuclear Science and Techniques*[2].

Además de la reacción deuterio-tritio, se investigan otros combustibles y sistemas alternativos, como la fusión protón-boro-11 (p-$B^{11}$), donde se producirían mayoritariamente partículas alfa en lugar de neutrones, que presenta la ventaja de reducir los problemas de activación estructural. Esta reacción requiere temperaturas mucho más elevadas, por lo que plantea retos adicionales que limitan su viabilidad práctica a escala internacional.

Por su parte, España participa de forma activa en la investigación en fusión a través del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), cuyo Laboratorio Nacional de Fusión desarrolla trabajos tanto en confinamiento magnético como en tecnologías asociadas al confinamiento inercial. El CIEMAT colabora en proyectos vinculados a ITER y a la hoja de ruta europea de fusión coordinada por EUROfusion, y contribuye al estudio de materiales estructurales avanzados, modelización de plasmas y análisis del ciclo del tritio. Asimismo, participa en el desarrollo de capacidades experimentales y diagnósticos para entornos de alta radiación dentro del marco internacional que impulsa la Unión Europea hacia aplicaciones energéticas futuras. ■

2 Jin Tao, Q., Zhao Yan, Z. y Xu Wang (2026). Theory of laser-assisted nuclear fusion. *Nuclear Science and Techniques, 37*(53). Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s41365-025-01879-x

## Bibliografía recomendada


OIEA (2020). *New CRP: Pathways to Energy from Inertial Fusion – Materials Research and Technology Development* (F13020). Disponible en: https://www.iaea.org/projects/crp/f13020

Tarifeno-Saldivia, A. *et al.* (2024). Ambient dosimetry in pulsed neutron fields with LINrem detectors. *Radiation, Physics, and Chemistry.* Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X24005930

Peñas, J. *et al.* (2024). Production of carbon-11 for PET preclinical imaging using a high-repetition rate laser-driven proton source. *Sci Rep.*, 14. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41598-024-61540-2

Millán-Callado, M. A. (2026). Single-event neutron time-of-flight spectroscopy with a petawatt-laser-driven neutron source. *Nature Communications.* Disponible en: https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.20026 ■



# La fosa atlántica

## Evaluación del estado de los residuos radiactivos en el océano

**Entre los años cincuenta y noventa del siglo XX, varios países europeos depositaron en torno a doscientos mil bidones de residuos nucleares en la fosa atlántica, a unos 750 km de la costa gallega. En la actualidad, entidades de varios países llevan a cabo una campaña científica de investigación de localización, para el análisis de su estado y el estudio del comportamiento de los radionúclidos en el ecosistema del océano profundo.**

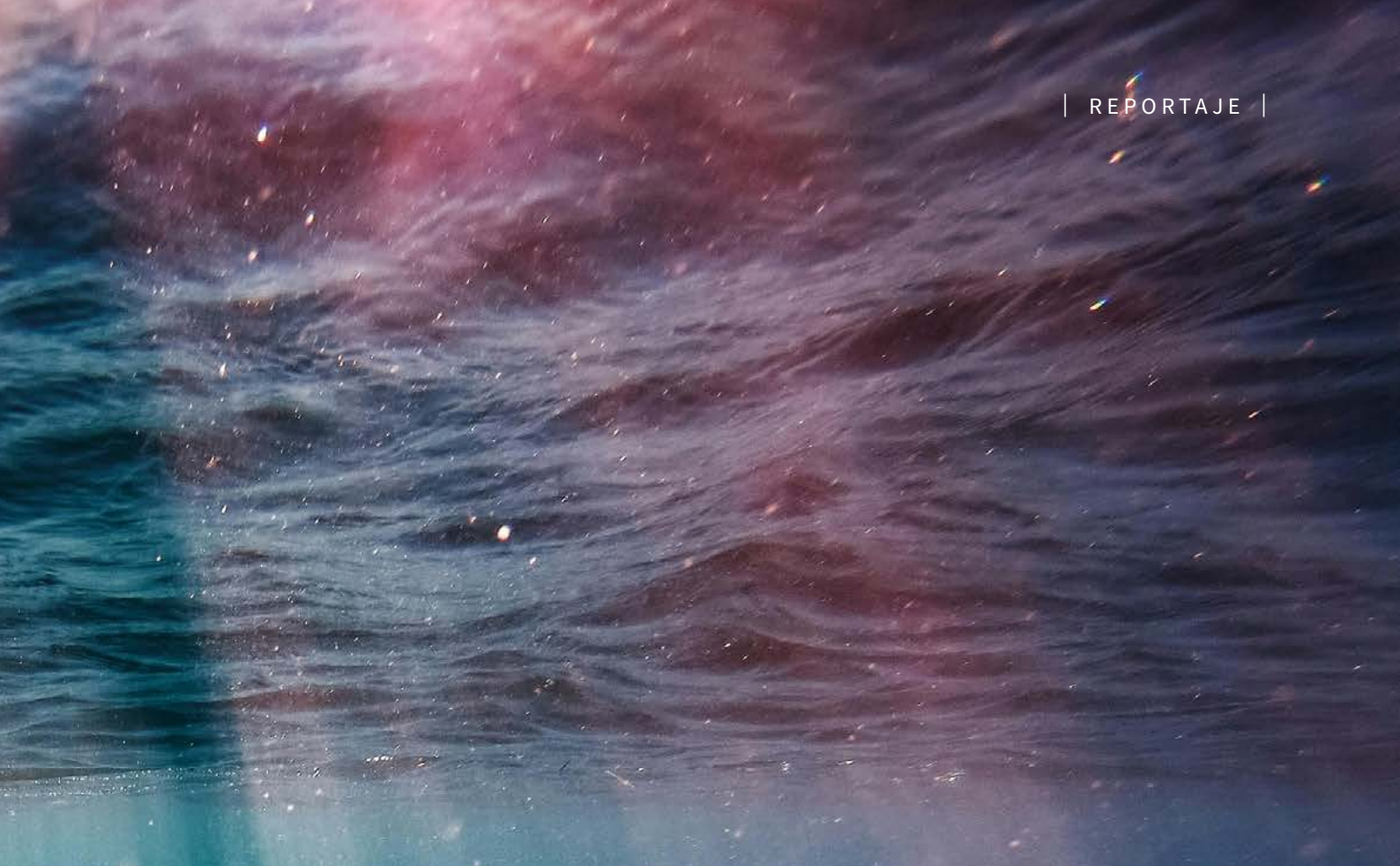
Texto: **Isabel Robles**

La industria nuclear ha generado residuos desde sus inicios, que es necesario regular y gestionar para que no supongan un peligro para la población o el medioambiente. Ante esta necesidad, diversos lugares, como minas abandonadas o el océano profundo, fueron considerados como los más apropiados para depositar material radiactivo.

A partir de la década iniciada en 1940, Francia, Reino Unido, Países Bajos, Bélgica, Italia, Suiza, Alemania y Suecia utilizaron la fosa atlántica en el Atlántico Noreste para depositar sus residuos. «Las planicies abisales, que se creían yermas, se consideraron como una posible solución. Situadas a cientos de kilómetros de la costa y a más de 4000 m de profundidad, estaban lejos del ser humano», explica Patrick Chardon, investigador en el laboratorio de física de la Universidad Clermont Auvergne[1].

Situada en pleno océano, esta depresión, como otras del Atlántico, se caracteriza por tener una topografía relativamente uniforme, temperaturas entre 2° C y 4° C y una dinámica sedimentaria muy lenta. Además, la ausencia de actividad tectónica significativa contribuyó a que fue-

1 Véase en: https://lejournal.cnrs.fr/articles/atlantique-sur-la-piste-des-futs-radioactifs



ra considerada durante décadas un entorno adecuado para verter este tipo de desechos.

Así, más de doscientos mil bidones metálicos con capacidad de hasta doscientos litros cada uno se arrojaron al mar entre 1946 y 1982. En su interior, compactados en hormigón o asfalto, se introdujeron residuos radiactivos de muy baja y media actividad, en su mayoría de vida corta.

No obstante, en 1975, la Convención para la prevención de la contaminación marina por el vertido de residuos y otras sustancias –o Convención de Londres– prohibió los vertidos de alto nivel radiactivo y consideró necesario obtener una autorización especial para el resto. Este enfoque fue revisado en 1983, cuando se acordó entre los Estados miembros suspender cualquier tipo de vertido al mar a la espera de contar con mayores evidencias científicas sobre los posibles daños que causaban a los ecosistemas.

En los años sucesivos, la comunidad científica, preocupada por los procesos de transferencia de radionucleidos antropogénicos a distintos organismos marinos –que potencialmente podían acabar afectando también al ser humano– comenzó a estudiar sus efectos. Por ello, en junio de 1984, IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) organizó la campaña oceanográfica EPICEA, que tomó fotografías del fondo marino de la fosa atlántica gracias al sumergible no tripulado Épaulard. En ellas aparecían los bidones arrojados que, aunque tenían algunas deformaciones y signos localizados de corrosión, se encontraban globalmente en buenas condiciones. También se apreció actividad biológica significativa en los sedimentos circundantes, lo que demostró la existencia de un ecosistema a esa profundidad y llevó a que, en 1993 se prohibiera totalmente la descarga de bidones con desechos radiactivos en el medio marino. En 1998, entró en vigor el convenio OSPAR (Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste), por el cual los países firmantes, entre ellos España, se comprometen a prevenir y combatir la contaminación marina en esta zona mediante la reducción de las descargas de sustancias peligrosas.

Sin embargo, para entonces, el Reino Unido ya había depositado en la fosa atlántica 140 000 bidones; Bélgica, 55 000, y Francia, 46 000, lo que suponía una actividad radiactiva de en torno a 36 TBq. Con el paso del tiempo, algunos elementos ya han decaído, como el cesio 134, y otros están en proceso, por lo que ha disminuido la actividad radiactiva total en la zona.

Tras la campaña de IFREMER en 1984, no ha habido seguimiento del estado de los bidones –aunque sí del nivel de radiactividad ambiental en la costa y el mar territorial– ni de su localización exacta por parte de los países europeos hasta 2025, cuando un equipo mayoritariamente francés (con la colaboración de diferentes organismos e instituciones internacionales, como la Universidad de Girona, que se encargará de analizar parte de las muestras recogidas) cartografió la zona.




*Robot Ulyx utilizado por la misión NODSSUM para cartografiar la fosa atlántica*

**NODSSUM: misión en la fosa atlántica**

Entre junio y julio, el buque oceanográfico L'Atalante partió de Brest y surcó las aguas del Atlántico en la primera fase del proyecto NODSSUM (Nuclear Ocean Dump Site Survey Monitoring), liderado por Patrick Chardon (Laboratorio de Física de la Universidad de Clermont-Ferrand) y Javier Escartin (Laboratorio de geología del ENS). Esta misión, llevada a cabo por el CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en colaboración con un equipo de IFREMER, tiene como objetivo principal identificar y cartografiar la distribución de los bidones, así como evaluar su estado. Del mismo modo, pretende medir la presencia de radionucleidos en el agua, los sedimentos y los organismos de la zona, estudiar su interacción con el ecosistema y caracterizar su transporte en el océano profundo.

Para ello, contaron con UlyX, robot autónomo de la flota oceanográfica francesa con capacidad para sumergirse hasta los 6000 m y que está dotado de un sonar de muy alta resolución y un batímetro que permite crear un plano en 3D del relieve del fondo marino. Además, una vez localizaron algunos de los barriles, se tomaron muestras de forma remota tanto del agua como de los sedimentos hallados a su alrededor e, incluso, se capturaron peces abisales con el fin de estudiar los efectos que pudiese tener la radiactividad en su organismo.

El equipo contó con un dispositivo de radioprotección a bordo para evitar riesgos radiológicos una vez recibían las muestras, tanto a la hora de analizarlas como de almacenarlas, lo que in-



cluía contenedores de plomo y otros equipos de protección.

Durante el mes que duró la expedición, el sumergible autónomo recorrió la zona de descarga a 70 m del fondo, lo que ha permitido documentar más de tres mil bidones en un área de 163 km² y detectar deformaciones, corrosión y fugas en algunos de ellos, aunque los niveles de radiación medidos no difieren de los valores de fondo ambiental. Ya en tierra, durante 2026, se analizarán las muestras –más de trescientas– y el agua –5000 l– recogidas y se preparará la siguiente

## Residuos nucleares en el mar



*Bidón con residuos radiactivos fotografiado durante la misión NODSSUM de 2025*

Existen diferentes tipos de materiales radiactivos que, a lo largo de los años, han llegado al mar. Según el OIEA, se trata fundamentalmente de vertidos sólidos –compactados con hormigón e introducidos en bidones metálicos, aunque también componentes de instalaciones nucleares–, depositados tanto de manera intencional como a causa de diversos accidentes.

En conjunto, se estima que existen 8,5 × $10^4$ TBq de desechos radiactivos en más de ochenta puntos submarinos del planeta. El 53 % de la radiación producida por estos desechos se encuentra en el océano Atlántico, donde destacan los bidones depositados frente al continente europeo, pero también los existentes frente a la costa norteamericana. A ellos se suman los recipientes del reactor de submarinos como el Seawolf, depositado en el lecho marino en 1959 por Estados Unidos.

Por su parte, el Ártico posee el 45 % del total de la actividad radiactiva de estos residuos, especialmente debido a los reactores nucleares navales que depositó la URSS entre 1965 y 1988, seis de los cuales todavía contenían combustible gastado. Asimismo, también se vertieron más de seis mil contenedores.

Por último, la URSS depositó reactores y otros desechos radiactivos en el Pacífico, en las proximidades de Japón, y Estados Unidos vertió bidones en las proximidades de Hawaii y de la costa oeste norteamericana, cuya actividad corresponde al 2 % restante.

Como señala el OIEA, «en el Atlántico Norte, el tritio representaba alrededor de un tercio de la actividad radiactiva. Junto con otros emisores beta y beta-gamma –como $^{90}$Sr, $^{134}$Cs, $^{137}$Cs o $^{55}$Fe–, constituía más del 98 % de la actividad total de los residuos. Además, estos desechos contenían también pequeñas cantidades (menos del 2 %) de radionucleidos emisores alfa, mayoritariamente isótopos de plutonio y americio». Las muestras de agua tomadas desde 1977 no han encontrado radiactividad relacionada con los vertidos de desechos, aunque en 1992 se detectaron concentraciones de $^{238}$Pu en las zonas alrededor de los residuos, lo que indica que se han producido fugas en los contenedores. La radiación se dispersará paulatinamente en el agua circundante y, sumada al decaimiento de los isótopos, conducirá a una reducción progresiva de la concentración radiactiva en el entorno marino. ■






**PATRICK CHARDON,**
INVESTIGADOR EN EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD CLERMONT AUVERGNE

*«Las planicies abisales, que se creían yermas, se consideraron como una posible solución. Situadas a cientos de kilómetros de la costa y a más de 4000 m de profundidad, estaban lejos del ser humano»*

parte de la campaña, prevista para el verano de 2026 o 2027. En esta ocasión, el objetivo será tomar muestras tanto de las inmediaciones de los bidones como de los propios residuos y analizar su composición –pueden contener desde lodos de procesos industriales hasta componentes metálicos contaminados, resinas de intercambio iónico o material de laboratorio– y su impacto medioambiental, ya que algunos radionucleidos se fijan a los sedimentos y pueden permanecer en la fosa atlántica hasta su decaimiento, pero otros son arrastrados por las corrientes marinas. En todo caso, la misión pretende aportar datos precisos que permitan actualizar los inventarios globales, mejorar los modelos de dispersión en aguas profundas y aportar evidencias sólidas para que autoridades nacionales y organismos como el OIEA puedan definir mejores estrategias.

### España y el control de la radiactividad

En 1981, el pequeño pesquero vigués Xurelo, equipado con un radar de apenas doce millas y una velocidad media de nueve nudos, se hizo a la mar desde Ribeira para protestar contra dos navíos holandeses que se encontraban en plena descarga de bidones con residuos radiactivos en la fosa atlántica. Las fotografías recorrieron Europa y, al año siguiente, la pequeña flota que se desplazó hasta allí estaba compuesta por el Pleamar, el Arosa I y el Sirius, un buque fletado por Greenpeace. Estas acciones



El pequeño pesquero vigués Xurelo, 1981.



La tripulación del «Xurelo» observando a los buques contaminantes.



*El Consejo de Seguridad Nuclear, desde su creación en 1980, controla el nivel de radiación de la costa gallega y cantábrica*

llevaron al Gobierno holandés a interrumpir el vertido de residuos nucleares en el océano y la organización ecologista abrió sus puertas en España.

No obstante, no fueron los únicos preocupados por estas actividades. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), desde su creación en 1980, controla el nivel de radiación de la costa gallega y cantábrica. Mediante estaciones de vigilancia que toman muestras del agua del mar, el CSN, en colaboración con CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), la Universidad de Cantabria y la Universidad de Santiago de Compostela, busca elementos como tritio, cesio, bario o cobalto, entre otros radionucleidos artificiales, en muestras de agua, sedimentos, mariscos y peces de puntos del litoral que van desde el cabo Silleiro, en Pontevedra, hasta el cabo de Ajo, en Cantabria, pasando por el cabo Villano y el cabo Ortegal.

Cada cuatrimestre, SASEMAR (Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima) toma muestras superficiales de diez litros de agua que se envían al CEDEX para su análisis. Del mismo modo, cada trimestre se recogen muestras de cinco litros de agua en el cabo de Ajo en recipientes sellados y refrigerados para garantizar su conservación y analizarlas en busca de actividad alfa y beta total, actividad beta residual, tritio y radionucleidos artificiales mediante espectrometría gamma. Además, se realizan análisis radiométricos específicos de $^{210}$Pb, $^{210}$Po, $^{224}$Ra, $^{226}$Ra y los isótopos de plutonio $^{238}$Pu y $^{239/240}$Pu.

El sistema español de vigilancia del CSN incluye controles periódicos sobre el ecosistema. Cada tres años también se toman muestras de flora y fauna del Cantábrico –algas, moluscos, peces– para verificar la exposición alimentaria de la población, se

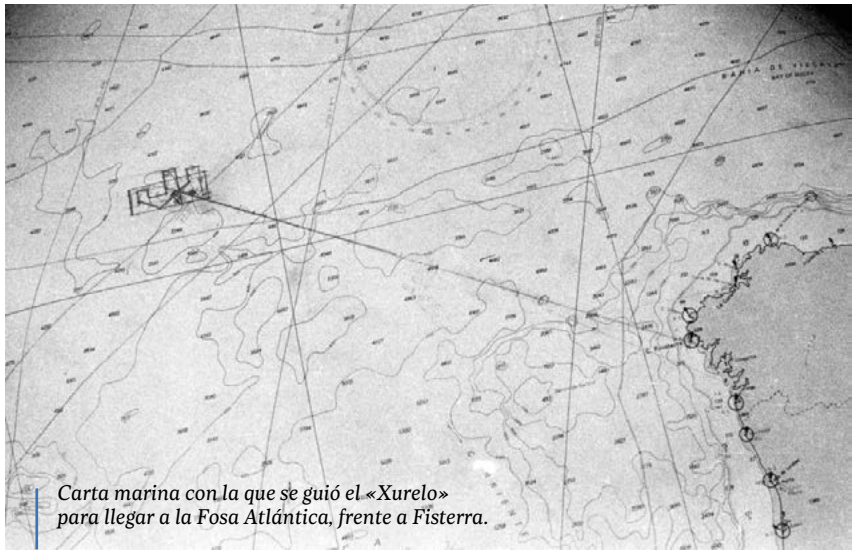



*Recibimiento a la tripulación del «Xurelo» en Ribeira.*

analizan trimestralmente muestras de «dieta mixta» en Bilbao, Santander, Oviedo y A Coruña, elaboradas a partir de alimentos representativos de la dieta semanal, incluyendo productos de origen marino.

En todos los puntos, las mediciones indican que no existen niveles de radiactividad significativos y que todos los valores son inferiores a los límites establecidos tanto por la normativa española como por la europea. En concreto, la Unión Europea, en aplicación de lo establecido en el artículo 35 del tratado EURATOM –por el que cada país miembro de la UE debe crear las instalaciones necesarias para el control permanente del índice de radiactividad de la atmósfera, las aguas y el suelo–, llevó a cabo una misión de verificación durante 2021 para comprobar el funcionamiento real de las instalaciones destinadas a vigilar de forma permanente los niveles de radiactividad.

*Las mediciones indican que no existen niveles de radiactividad significativos y que todos los valores son inferiores a los límites establecidos tanto por la normativa española como por la europea*



*Carta marina con la que se guió el «Xurelo» para llegar a la Fosa Atlántica, frente a Fisterra.*



Durante la inspección, los expertos europeos examinaron sobre el terreno los sistemas que sustentan la vigilancia española: visitaron el laboratorio del CEDEX encargado de analizar las aguas costeras y continentales, revisaron los procedimientos de muestreo, las cadenas de custodia, la calibración de los equipos y la trazabilidad de los datos, y evaluaron el modo en que el CSN coordina la supervisión radiológica con otros organismos. También contrastaron la información que España remite periódicamente a la Comisión Europea.

Las conclusiones a las que llegaron indican que los controles existentes son adecuados para detectar cualquier anomalía y que las instalaciones inspeccionadas funcionan de manera eficaz para garantizar la seguridad de la población y del medioambiente.

Por su parte, el CSN, a través de su página web, pone a disposición del público los datos obtenidos en cada medición. En el caso concreto de la Red de Estaciones de Muestreo (REM), los datos pueden consultarse desde 2006, si bien la base histórica disponible abarca resultados desde 1990. La página se actualiza anualmente, una vez que el CSN recibe los análisis procedentes de los diferentes organismos implicados, normalmente durante el primer trimestre del año siguiente.

Además, anualmente elabora un informe público de vigilancia de la radiactividad ambiental en el que se recopila, analiza y presenta la evolución temporal de los valores registrados. También se remite a las Cortes un resumen detallado de los resultados obtenidos en las distintas redes de vigilancia junto con las respuestas que los diferentes grupos parlamentarios plantean al CSN como responsable de la supervisión de la calidad radiológica medioambiental. ■

## Bibliografía recomendada


Cailloce, Laura (2025). Atlantique: sur la piste des fûts radioactifs. *CNRS Le Journal*. Disponible en: https://lejournal.cnrs.fr/articles/atlantique-sur-la-piste-des-futs-radioactifs

CNRS (2025). Déchets radioactifs: une mission scientifique part cartographier les fûts immergés de l'Atlantique. *CNRS*. Disponible en: https://www.cnrs.fr/fr/presse/dechets-radioactifs-une-mission-scientifique-part-cartographier-les-futs-immerges-de

CNRS (2025). *NODSSUM*. Disponible en: https://miti.cnrs.fr/radiocean/

Comisión Europea (2021). *Verification under the terms of Article 35 of the Euratom Treaty. Technical Report. SPAIN. Galicia and Cantabrian coastal marine environment*. Disponible en: 808d5e51-8866-15e2-d743-70c91ae3d3eb

CSN (2025). El CSN informa de la calidad radiológica de las aguas costeras españolas. *CSN*. Disponible en: https://www.csn.es/-/el-csn-informa-de-la-calidad-radiologica-de-las-aguas-costeras-espanolas

IAEA (2015). *Inventory of Radioactive Material Resulting from Historical Dumping, Accidents and Losses at Sea*. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1776_web.pdf.



# Ciudades inteligentes

## Tecnología, energía y gobernanza para un nuevo modelo urbano

Naciones Unidas mantiene que la urbanización es uno de los rasgos estructurales del siglo XXI. En su revisión 2025 de *World Urbanization Prospects*, la unidad técnica de la División de Población de la ONU actualiza las proyecciones y los datos comparables sobre crecimiento urbano hasta 2050. Por su parte, la Agencia Internacional de la Energía recuerda que las ciudades concentran ya una parte decisiva del consumo energético y de las emisiones globales, lo que convierte la gestión urbana en una pieza central de la transición climática. En otras palabras, la *smart city* o ciudad inteligente no es un complemento de la política pública, sino uno de sus escenarios principales.

Texto: **Luis Tejedor**

El imparable proceso de urbanización constituye uno de los rasgos estructurales del siglo XXI. Según los *World Urbanization Prospects* de Naciones Unidas, se estima que en 2050 cerca del 68 % de la población mundial residirá en áreas urbanas, lo que aumentará significativamente la demanda de infraestructuras, energía, vivienda y servicios básicos. Al mismo tiempo, la transición climática redefine el papel de las ciudades. Un ejemplo es la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 del Gobierno de España, que fija una reducción aproximada del 90 % de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990, con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática.




En este contexto, la ciudad inteligente deja de ser una etiqueta tecnológica para convertirse en un instrumento de política pública. La Comisión Europea la define como un entorno en el que las redes y servicios tradicionales se vuelven más eficientes mediante el uso de soluciones digitales en beneficio de ciudadanos y empresas. En España, la serie de normas UNE 178 la concibe como una visión integral orientada a mejorar la calidad de vida y favorecer un desarrollo sostenible basado en la mejora continua.

### Decisiones apoyadas en datos

Aunque la infraestructura tecnológica de la ciudad inteligente se sustenta en sensores, conectividad de alta capacidad y plataformas de análisis que permiten observar el funcionamiento urbano en tiempo real, la tecnología adquiere más valor cuando se convierte en criterio de decisión.

Un informe del McKinsey Global Institute estimó que determinadas aplicaciones digitales urbanas podrían mejorar entre un 10 % y un 30 % algunos indicadores de calidad de vida. Estas mejoras dependen de la integración efectiva de las soluciones tecnológicas en la gestión urbana y de la existencia de una gobernanza que permita aprovechar los datos para optimizar servicios como la movilidad, la seguridad y la respuesta ante emergencias.

Más allá del catálogo tecnológico, resulta fundamental identificar qué soluciones aportan valor real y qué barreras persisten al integrar sistemas complejos. Almirall destaca



**Esteve Almirall,** director del Center for Innovation in Cities de ESADE, recuerda que «el término *smart cities* surgió en la primera década del siglo XXI, en el marco de un programa impulsado por IBM. Desde entonces, se ha convertido en un concepto paraguas que engloba enfoques muy diversos sobre la gestión urbana». En estos veinticinco años, su significado ha evolucionado notablemente: «primero se asoció a la sensorización de las ciudades, después a la participación ciudadana y al uso de datos abiertos; más tarde, aparecieron sistemas avanzados de control urbano –como City Brain, plataforma de gestión urbana basada en inteligencia artificial desarrollada por Alibaba Cloud–, seguidos por gemelos digitales y, recientemente, por inteligencia artificial generativa. Esta evolución explica la diversidad de enfoques que hoy conviven bajo la idea de ciudad inteligente», afirma Almirall.

## Gemelos digitales, simular antes de actuar

Uno de los desarrollos más avanzados en la evolución de las *smart cities* es el gemelo digital urbano (*local digital twin*): una representación virtual de activos, procesos y sistemas urbanos alimentada por datos y analítica, capaz de ejecutar simulaciones para apoyar decisiones sobre movilidad, energía, planeamiento o resiliencia. La Comisión Europea lo define como una herramienta modular, basada en estándares, que ayuda a las ciudades a simular, analizar y planificar su entorno de forma más eficaz. Su interés técnico reside en que permite ensayar escenarios antes de intervenir sobre la ciudad real: desde el impacto de una nueva línea de transporte hasta la respuesta de un distrito ante olas de calor o cambios en la demanda eléctrica. La clave no está solo en visualizar datos, sino en integrarlos con modelos y reglas de interoperabilidad. De ahí que la Comisión Europea haya impulsado un EU Local Digital Twin Toolbox, mientras que organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) insisten en su valor para una planificación más sostenible y centrada en las personas. Para un enfoque científico, el reto ya no es si construir gemelos digitales, sino con qué calidad de datos, qué nivel de validación y qué capacidad institucional para convertir simulaciones en decisiones verificables.

que «el ámbito de las *smart cities* incluye desarrollos muy diversos que han surgido a lo largo del tiempo. Un ejemplo es la plataforma City Brain, implantada en algunas ciudades asiáticas, que integra sistemas de monitorización del tráfico, contaminación y seguridad, y permite detectar incidencias –como accidentes en autopistas– de forma automática, coordinando la respuesta mediante sistemas de inteligencia artificial». En su opinión, «las principales líneas de avance se sitúan hoy en la movilidad autónoma y la inteligencia artificial aplicada a los servicios urbanos. Vehículos sin conductor, robotaxis y drones de reparto podrían transformar el transporte urbano y reducir costes, mientras que la IA generativa empieza a agilizar la atención al ciudadano y a simplificar trámites administrativos».

### Energía y seguridad

El ámbito energético concentra buena parte de la transformación urbana. La creciente electrificación y la integración de energías renovables están modificando la arquitectura de los sistemas urbanos y obligan a incorporar herramientas digitales para gestionar la demanda, las redes y los servicios asociados. En España, iniciativas impulsadas por Red.es han promovido proyectos de digitalización en entidades locales dentro del programa **C**iudades y Territorios Inteligentes, que desde 2014 ha financiado 61 proyectos y movilizado más de doscientos millones de euros ha-







**José de la Uz,** presidente de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI), asegura que «esto es posible gracias a una mayor disponibilidad de información, a una regulación más precisa de los edificios y sus instalaciones y al uso de algoritmos e inteligencia artificial que optimizan sistemas como la climatización, la iluminación o la producción energética. Los proyectos de digitalización y sensorización, en cierta medida, permiten lograr eficiencia energética y reducir emisiones y consumo».

## Cómo se mide una ciudad inteligente

La madurez de una *smart city* no se evalúa solo por la cantidad de sensores o de aplicaciones desplegadas, sino por su capacidad para traducir datos en mejoras verificables del servicio urbano. En ese terreno, una de las referencias internacionales más sólidas es la norma ISO 37122:2019, que establece definiciones, metodologías e indicadores para ciudades inteligentes y se concibe como complemento de ISO 37120, centrada en servicios urbanos y calidad de vida. La norma permite medir el progreso con métricas comparables en ámbitos como energía, movilidad, residuos, telecomunicaciones, gobernanza o seguridad. Para el caso de los edificios, la Comisión Europea desarrolla además el Smart Readiness Indicator (SRI), que evalúa la capacidad de un inmueble para usar tecnologías inteligentes con tres funciones clave: optimizar la eficiencia energética, adaptarse a las necesidades del ocupante y responder a señales de la red, incluida la flexibilidad energética. El SRI cubre nueve dominios técnicos –entre ellos calefacción, refrigeración, iluminación, electricidad, recarga de vehículos eléctricos y monitorización y control– y constituye una herramienta especialmente útil para conectar la escala del edificio con la escala urbana.





cia soluciones *smart*, dentro de una iniciativa con medidas valoradas en 244,97 millones.

Para los municipios, garantizar la estabilidad del suministro y la coordinación técnica se ha convertido en una exigencia permanente.

No obstante, la interconexión de redes introduce nuevas vulnerabilidades. La European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) advierte que los sistemas energéticos forman parte de un ecosistema cada vez más interdependiente de infraestructuras críticas. Por ello, la agencia subraya la necesidad de reforzar la ciberseguridad en redes eléctricas, sistemas industriales y plataformas digitales que sostienen el funcionamiento de las ciudades inteligentes.

La defensa frente a ciberamenazas constituye uno de los principales desafíos de las ciudades actuales. Aunque De la Uz enfatiza que «la RECI ha establecido una línea de trabajo destinada a la ciberseguridad para apoyar a las *smart cities*», Almirall adopta un enfoque más amplio, señalando que «son cuestiones que habría que reorganizar. Pretender que las ciudades o incluso las regiones gestionen esto por sí mismas es poco realista. Si un país ya tiene dificultades, imaginemos una ciudad. Simplemente no se podría asumir el coste».

## Una ciudad para vivir

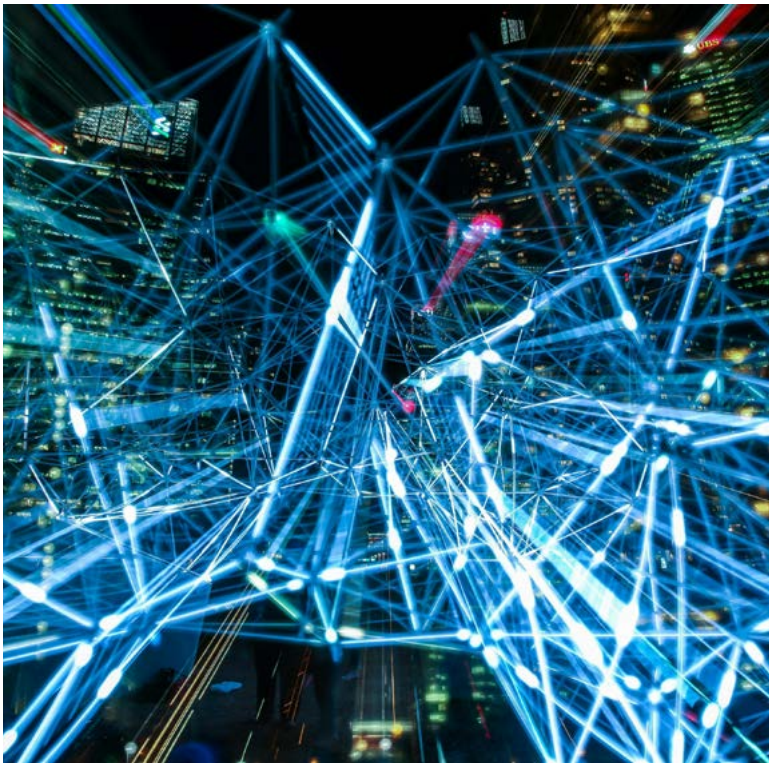
La ciudad inteligente se materializa también en la escala física del entorno construido. La incorporación de sistemas de gestión energética en edificios y la mejora del rendimiento constructivo reflejan esta evolución. La industrialización de la vivienda, mediante módulos fabricados en serie y ensamblados *in situ*, ofrece una vía para reducir plazos y costes, mejorar la trazabilidad constructiva e incorporar estándares energéticos elevados desde la fase de diseño. Este modelo facilita, además, la integración posterior en plataformas urbanas digitales y sistemas de monitorización energética.



Los edificios son especialmente relevantes en el ecosistema urbano porque concentran cerca del 40 % del consumo energético final en Europa y más de un tercio de las emisiones ligadas a la energía, lo que explica el peso creciente de la automatización, la electrificación y la gestión inteligente de la demanda energética en las políticas urbanas contemporáneas y de descarbonización. La Comisión Europea impulsa el Smart Readiness Indicator (SRI), un esquema de evaluación que mide la capacidad de un inmueble para utilizar tecnologías inteligentes y responder a las necesidades del ocupante y de la red.

## Ciberseguridad, la cara menos visible de la ciudad inteligente

Cuanto más conectada está una ciudad, más crítica resulta su ciberseguridad. La interdependencia entre energía, agua, transporte, telecomunicaciones y servicios digitales multiplica el riesgo de efectos en cascada: un incidente en un sistema puede comprometer otros servicios esenciales. ENISA recuerda que alcanzar un alto nivel común de ciberseguridad en la Unión exige una visión integral de la madurez digital de los Estados y de las entidades críticas, y que la NIS2 (Directiva 2022/2555, sobre medidas destinadas a garantizar un elevado nivel común de ciberseguridad en la Unión) ha convertido la resiliencia digital en una cuestión estructural, no solo tecnológica. El problema no se limita a los ataques externos. También incluye escasez de talento especializado, fragmentación organizativa, dependencia de terceros, déficits de inversión y dificultad para sostener capacidades a largo plazo. En sus informes recientes, ENISA subraya que la asignación suficiente de recursos humanos y presupuestarios es esencial para mantener y elevar la resiliencia. En el caso de las *smart cities*, esto implica que la sensorización, la gestión energética o la automatización de servicios públicos deben diseñarse desde el principio con criterios de seguridad por diseño, continuidad operativa e interoperabilidad regulatoria. La ciudad inteligente no puede ser solo eficiente: debe ser, ante todo, robusta.







**Nuria González Rabanal,** profesora de Economía y Estadística de la Universidad de León, aclara que «en el caso de la vivienda modular, algunos estudios se centran en cómo la inteligencia y la digitalización pueden mejorar la productividad, reducir los tiempos de construcción y optimizar los *trade-offs* –equilibrios entre automatización, costes y productividad– en la fabricación de vivienda modular». Actualmente, existen investigaciones que analizan si la implementación de tecnologías digitales y la automatización en la construcción modular, aplicando un modelo de análisis coste-beneficio, permite realmente reducir costes. La innovación en este campo está liderada por Canadá, China y Estados Unidos. «No obstante, este tipo de iniciativas se ve limitado por factores como el precio del suelo y las políticas de cada Estado para promover estos modelos mediante vivienda pública o incentivos fiscales», matiza González Rabanal.

### La buena gobernanza

Más allá de las innovaciones tecnológicas, la dimensión institucional condiciona el éxito del modelo de ciudad inteligente. Sin estructuras administrativas capaces de integrar innovación, financiación y talento especializado, la tecnología pierde coherencia.

El **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)** impulsa la digitalización y la modernización de los servicios públicos en España, apoyando proyectos de conectividad, datos urbanos e infraestructuras 5G que pueden



mejorar la gestión de la movilidad, la energía y otros servicios urbanos. Sin embargo, disponer de fondos no exime de una planificación estratégica y una evaluación rigurosa de resultados, esenciales para que las iniciativas tengan un impacto real y sostenible en las ciudades.

La coordinación entre niveles de gobierno y la colaboración público-privada se han convertido en elementos centrales. La interoperabilidad técnica debe ir acompañada de interoperabilidad institucional. Almirall lamenta la actividad regulatoria de las administraciones, al señalar que «especialmente en Estados Unidos y Europa, muchos ámbitos, como el energético, dependen de distintas entidades, organizaciones y agencias que a menudo están desconectadas y persiguen intereses distintos. Esta maraña regulatoria no se da de la misma manera en países como China o Japón, donde existe un organismo central que coordina estas cuestiones y facilita considerablemente la planificación».

González Rabanal destaca la necesidad de financiación sostenida para garantizar la transformación estructural de las ciudades: «el avance científico y la innovación siempre requieren instrumentos de financiación mantenidos en el tiempo. Por ello, resulta determinante decidir un modelo estructural a largo plazo para este tipo de inversiones. La financiación no es solo cuestión de importe, sino también de eficiencia en el gasto y de diseño de los instrumentos que permitan una transformación estructural y sostenida». Además, añade que «el informe del Tribunal de Cuentas Europeo de 2023 sobre las ciudades inteligentes remarca que, aunque exista financiación, la fragmentación de los recursos dificulta su escalado y evidencia la presencia de demasiadas fuentes con poca capacidad de integración presupuestaria y técnica».

Respecto a la evaluación de los resultados, González Rabanal subraya que «al medir los efectos de la asignación presupuestaria en el desarrollo de ciudades inteligentes, no se trata únicamente de calcular el retorno de la inversión, sino también de analizar el impacto en términos de cambios positivos o negativos derivados de las actividades financiadas. Entre los beneficios se incluyen mejoras en la calidad de vida, reducción de emisiones de $CO_2$, mayor cohesión social y bienestar general, etc.».

El objetivo es que las ciudades inteligentes mejoren de manera tangible el día a día de sus habitantes. Almirall recuerda con pragmatismo que «en el sur de Europa hemos pasado bastante tiempo centrados en la sostenibilidad, lo cual es positivo, sin duda. Pero al mismo tiempo hemos descuidado factores como la eficiencia en los servicios públicos. Servicios privados como los de Amazon toman decisiones en milisegundos, mientras que en algunos servicios públicos las decisiones técnicas pueden tardar años, sin que se comprenda la razón. Esto debería incluirse en los indicadores. La sociedad necesita que los servicios públicos sean eficientes y resuelvan problemas de manera ágil». En su opinión, una administración ineficiente genera costes enormes para sus ciudadanos y reduce su calidad de vida. La asignatura pendiente es lograr administraciones eficientes y medir cómo están atendidos los ciudadanos y con qué rapidez. Si algún día conseguimos eso, daremos paso a otra visión de país». ■

**Jaime Domínguez Abascal**
Presidente de la Real Academia de Ingeniería

# «Europa debe esforzarse por atraer talento y, sobre todo, evitar su fuga, especialmente en áreas punteras de la ingeniería»

Jaime Domínguez Abascal es catedrático de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Sevilla y presidente de la Real Academia de Ingeniería. Su trayectoria se ha centrado en la dinámica e integridad estructural de sistemas mecánicos y en biomecánica, con trabajos sobre vibraciones no lineales, impacto, fatiga y crecimiento de grietas en componentes mecánicos, así como sobre el comportamiento biomecánico del tejido óseo. Ha desempeñado responsabilidades relevantes en la organización del sistema de investigación, como director de la Oficina de Gestión de la Investigación Científica y Técnica (OGICYT) y de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la Universidad de Sevilla o coordinador en la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (ANEP). Dirige el Centro Andaluz de Metrología desde 2001 y participa en órganos de gobierno del International Center for Mechanical Sciences. Académico de la Real Academia de Ingeniería desde 2001, ha recibido, entre otros, el Premio Andalucía de Investigación Antonio de Ulloa.

Texto: **Pablo Santamarta**

**Su carrera ha combinado investigación en ingeniería mecánica, más de un centenar de proyectos de I+D y responsabilidades en gestión científica. ¿Qué etapas han sido más determinantes en su trayectoria?**

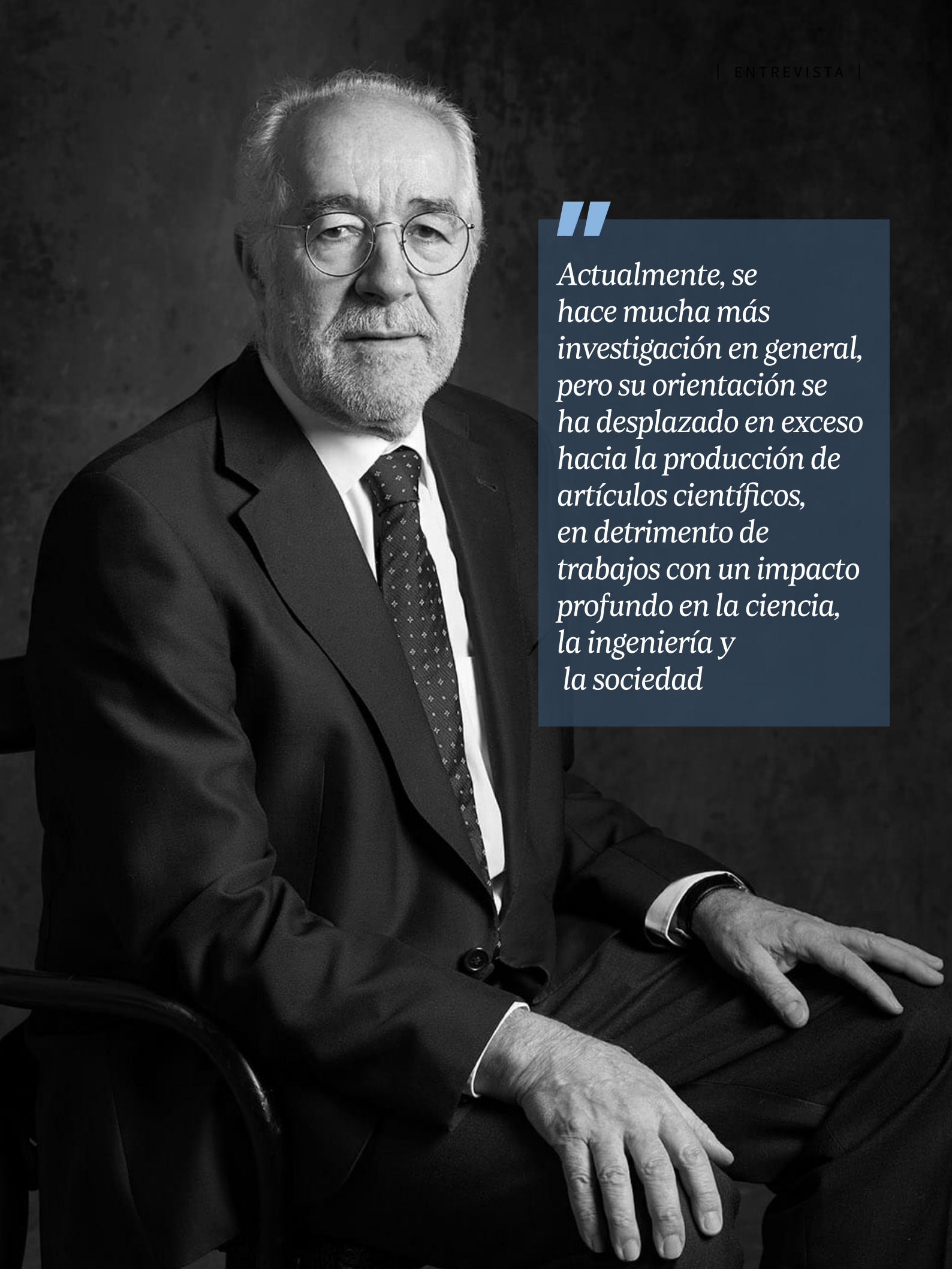
Sin duda, las más determinantes han sido aquellas etapas en que las que he mejorado de forma intensa mi formación, especialmente durante la realización de la tesis doctoral y los más de dos años de estancia en centros internacionales de investigación. La decisión que marcó un punto de inflexión fue la de abandonar mi trabajo como ingeniero en la industria, tras terminar la tesis, para dedicarme plenamente a la docencia, la investigación y la transferencia de conocimiento en la universidad.

**Obtuvo la cátedra de Ingeniería Mecánica con apenas veintiocho años. ¿Cómo ha evolucionado la investigación en la universidad española desde entonces?**

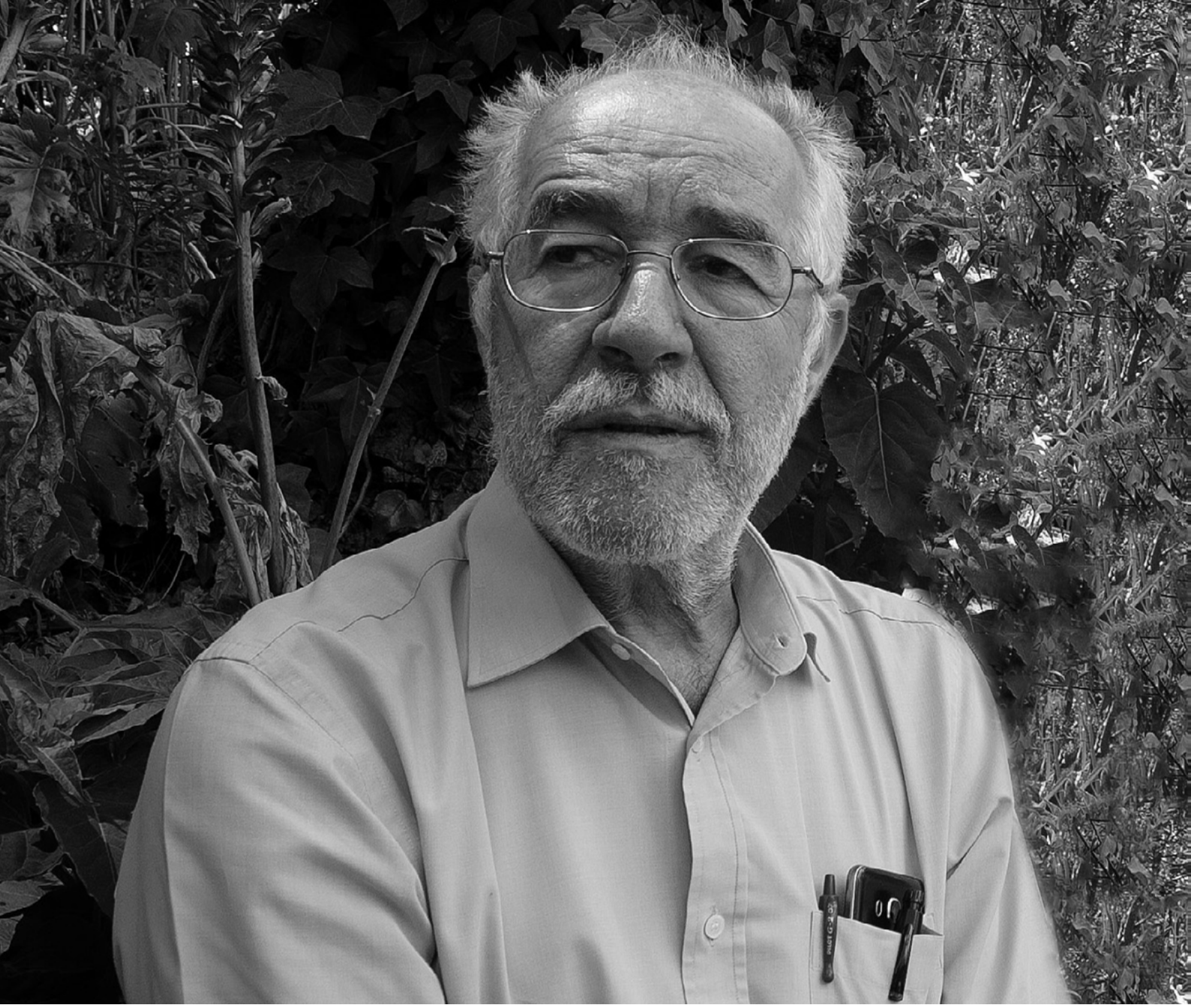
Cuando inicié mi carrera, en ingeniería había pocos investigadores dedicados plenamente a esta labor, aunque ya había algunos de gran nivel, que nos inculcaron el espíritu investigador a los jóvenes de aquella época. Actualmente, se hace mucha más investigación en general, pero su orientación se ha desplazado en exceso hacia la producción de artículos científicos, en detrimento de trabajos con un impacto profundo en la ciencia, la ingeniería y la sociedad.

**¿Cómo ha cambiado en estas décadas el ecosistema investigador español de ciencia, ingeniería e innovación?**

A finales de los años ochenta y principios de los noventa del pa-



*Actualmente, se hace mucha más investigación en general, pero su orientación se ha desplazado en exceso hacia la producción de artículos científicos, en detrimento de trabajos con un impacto profundo en la ciencia, la ingeniería y la sociedad*



sado siglo se hizo un gran esfuerzo por impulsar la investigación y la transferencia de conocimiento con los planes nacionales, los sexenios de investigación, la creación de la ANEP, las OTRI, la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI) y, posteriormente, la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA). Estos instrumentos han sido fundamentales para el desarrollo de la investigación. Sin embargo, como decía anteriormente, se ha centrado demasiado en la publicación de artículos en revistas de impacto y menos en realizar una investigación de impacto económico y social a medio y largo plazo. Es necesario reorientar algunos criterios, fomentando la creación de grupos potentes de investigación, equipos interdisciplinares y la investigación con objetivos de impacto real.

**La ingeniería española ha experimentado una transformación profunda en las últimas décadas. ¿Cuáles han sido para usted los cambios más decisivos?**

La participación en proyectos internacionales, principalmente europeos, y la colaboración con el entorno socioeconómico. Sin duda, han permitido dar un salto cualitativo en los objetivos de los proyectos y en su desarrollo.

**¿Qué papel juega la Real Academia de Ingeniería para favorecer la proyección internacional de la ingeniería española y la circulación de talento y conocimiento entre España y los grandes polos científicos?**

Uno de los principales objetivos de la Real Academia de Ingeniería es promover la calidad y la competencia de la ingeniería, tanto a nivel nacional como internacional. A nivel nacional, promovemos premios a jóvenes investigadores en ingeniería y empresas innovadoras, con la participación de un buen número de candidatos. A nivel internacional, la colaboración con academias de otros países a través de las orga-

nizaciones de academias europeas, Euro-CASE (Consejo Europeo de Academias de Ciencias Aplicadas, Tecnologías e Ingeniería), e internacional, CAETS (Consejo Internacional de Academias de Ingeniería y Ciencias Tecnológicas), permite analizar problemas de relevancia económica y social, así como proponer soluciones y estrategias en los congresos anuales de ambas organizaciones.

**¿Cuál debe ser la misión de Europa y de España en este sentido?**

Europa debe esforzarse por atraer talento y, sobre todo, evitar su fuga, especialmente en áreas punteras de la ingeniería, que serán decisivas para el desarrollo futuro, como son la digitalización, la computación cuántica, la inteligencia artificial o la fusión y otras energías renovables. Como país con peso en Europa, España puede y debe desempeñar un papel relevante.

**Una parte importante de su trabajo se ha centrado en la dinámica de sistemas mecánicos con elementos flexibles y en fenómenos complejos como vibraciones no lineales o impactos. ¿Por qué siguen siendo fundamentales en el diseño de sistemas tecnológicos avanzados?**

Las máquinas actuales requieren estructuras más ligeras –por tanto, más flexibles– y mayor eficiencia, lo que implica velocidades de funcionamiento más altas. Esto hace que la dinámica de vibraciones tenga un papel crucial, pues incrementa esfuerzos y puede generar inestabilidades. Un ejemplo claro es el aumento de la velocidad de los trenes, que ha exigido nuevos diseños de vías, suspensiones, pantógrafos y catenarias debido a los problemas dinámicos y de estabilidad derivados de esas mayores velocidades.

*El progreso vendrá de la mano de nuevas tecnologías, digitalización e inteligencia artificial. La ingeniería es la responsable de absorber y aplicar estas innovaciones, lo que exige invertir en formación y promover el talento científico y tecnológico, especialmente en las profesiones STEM*

**Ha investigado procesos como fatiga, crecimiento de grietas o fenómenos asociados al *fretting*. ¿Qué importancia tienen en la seguridad y fiabilidad de infraestructuras y sistemas industriales?**

El conocimiento del comportamiento a fatiga de sistemas estructurales de las máquinas es fundamental para la seguridad y la eficiencia, ya que un porcentaje muy alto de los fallos en sistemas mecánicos tales como ferrocarriles o aviones son debidos a fatiga. Comprender estos procesos permite diseñar sistemas más seguros y establecer protocolos de inspección que eviten el crecimiento de grietas hasta provocar fallos que en muchos casos pueden catastróficos.

**¿Qué aportaciones puede hacer la ingeniería mecánica al avance de la medicina y la biotecnología?**

La ingeniería mecánica es cada vez más relevante en medicina y biotecnología, siempre en estrecha colaboración con los profesionales sanitarios. Hasta hace poco, solo se consideraba el efecto de la química sobre el comportamiento de los órganos y tejidos, pero hoy sabemos que los estímulos mecánicos también modifican el comportamiento. El ejemplo más simple y bien conocido es el desarrollo muscular y óseo con el ejercicio físico. Además, la ingeniería mecánica permite simular el comportamiento mecánico de tejidos, como arterias, o implantes antes de su colocación, con lo que ello puede servir de ayuda en las intervenciones quirúrgicas.

**¿Cómo han cambiado las herramientas y metodologías de la ingeniería –simulación, modelización, análisis experimental– en las últimas décadas?**

Las herramientas y metodologías han cambiado por completo. Cuando realicé mi tesis, en mi Escuela solo había un ordenador con 64 kB de RAM y 2 MB de almacenamiento. Hoy cualquier portátil dispone de al menos 16 GB de RAM y más de 500 GB de almacenamiento, con velocidades de cálculo miles de veces superiores. Hoy, los programas de simulación permiten reproducir comportamientos inimaginables entonces, y los métodos experimentales han avanzado de forma extraordinaria, permitiendo ensayos complejos, automatizados y de alta precisión.

El *fretting* es un fenómeno de desgaste y daño superficial que se produce entre dos superficies en contacto sometidas a pequeñas oscilaciones relativas, generalmente de muy baja amplitud. Estos microdeslizamientos repetidos generan degradación del material, iniciación de grietas y, en muchos casos, fallos por fatiga, especialmente en uniones mecánicas sometidas a cargas cíclicas.

**¿Qué rasgos del modelo productivo español limitan el crecimiento basado en conocimiento y tecnología?**

Nuestro modelo sigue sustentándose en actividades de bajo valor añadido y baja productividad. Es imprescindible evolucionar hacia un modelo más industrializado, basado en el conocimiento, la digitalización y actividades de alto valor añadido como la ingeniería, la consultoría o los servicios financieros avanzados.

**Europa pierde posiciones relativas frente a Estados Unidos y China en sectores tecnológicos estratégicos. ¿Por qué?**

Existen diferencias que proceden, entre otros factores, de una mayor inversión en ciencia y tecnología, una digitalización más avanzada y economías de escala superiores. Para competir, Europa debe reforzar la agrupación de recursos humanos y materiales y aumentar su inversión en ellos y en proyectos de mayor riesgo.

**¿Qué puede aportar la ingeniería para cerrar la brecha de productividad respecto a los países más avanzados de la Unión Europea?**

La ingeniería es esencial. El progreso vendrá de la mano de nuevas tecnologías, digitalización e inteligencia artificial. La ingeniería es la responsable de absorber y aplicar estas innovaciones, lo que exige invertir en formación y promover el talento científico y tecnológico, especialmente en las profesiones STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics).

**¿Qué es necesario para reforzar la transferencia de conocimiento hacia el tejido productivo?**

Es fundamental intensificar la colaboración entre empresas, centros de investigación y centros tecnológicos, que actúan como puente entre ambos. Los proyectos conjuntos, así como las estancias prolongadas de investigadores en empresas y de tecnólogos en centros de investigación, son herramientas clave para mejorar la transferencia de conocimiento. ■



# ASPECTOS REGULADORES DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS (SMR)

Texto: **José M.ª Balmisa /** Coordinador Técnico de Tecnología Nuclear

El presente artículo expone algunos retos y desafíos reguladores relacionados con las características innovadoras de los SMR. La primera parte introduce brevemente los tipos de SMR y la situación actual de licenciamiento en países del entorno español, para analizar después su impacto y cómo los están afrontando algunos reguladores.

Los Small Modular Reactors (SMR) o reactores modulares nucleares se definen por tener potencias eléctricas inferiores a 300 Mwe[1]. Sus características técnicas innovadoras los hacen, al menos en principio, más seguros que los reactores comerciales en operación de generaciones II, III y III+[2].

Existen varios catálogos de SMR, por ejemplo, el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA)[3] recoge 83 diseños y la Agencia para la Energía Nuclear (NEA, Nuclear Energy Agency)[4], 127. Algunos SMR son reactores compactos de agua ligera (LWR)[5], como el norteamericano NuScale y el coreano iSMR (Innovative SMR), pero los verdaderamente innovadores pertenecen a la generación IV, diseños incluidos en los seis grupos siguientes del proyecto Generation IV International Forum (GIF IV)[6] (figura 1).

Algunas de las ventajas innovadoras que presentan estos SMR son: seguridad pasiva, funcionamiento a bajas presiones cerca de la atmosférica[7], «término fuente» muy pequeño, con lo que se reducen los planes de emergencia exteriores y la contención clásica de hormigón armado, como última barrera frente al escape de productos de fisión en caso de accidentes, nuevos combustibles con puntos de fusión muy altos que eliminan de forma práctica el daño al combustible, incluso ante pérdida de refrigeración, etc.

Aprovechando estas mejoras en la seguridad y con objeto de conseguir los objetivos de cero emisiones y proporcionar suministro eléctrico continuo y estable a centros de datos, exigencias energéticas industriales etc., organizaciones internacionales como el OIEA[8] y la NEA[9, 10] han lanzado iniciativas para facilitar el diseño, construcción y operación de SMR. Sin embargo, según el director general del OIEA[11], Rafael Grossi, para conseguir este despliegue de SMR en los próximos años, es necesario resolver aspectos reguladores, financieros, de la cadena de suministro, etc., para vencer el conocido *factor de escala*.

Actualmente, solo hay SMR operando en la Federación Rusa, en buques rompehielos de propulsión nuclear, y en China, donde desde 2023 opera el reactor de alta temperatura HTR-PM, que utiliza como combustible un lecho de *pebbles* o esferas de combustible TRISO, con un punto de fusión muy elevado y refrigeradas por helio a 70 bares de presión y temperatura de salida de helio de 550 ºC (figura 2).

En EE. UU., el regulador Nuclear Regulatory Commission (NRC), certificó el diseño del SMR NuScale de 50 Mwe por módulo el 11 de septiembre de 2020 y, recientemente, ha aprobado la certificación de diseño de este reactor con potencia eléctrica por módulo de 77 Mwe[12].

En diciembre de 2025, se hizo pública la evaluación del cuerpo técnico de la NRC de la solicitud de permiso de construcción de la central nuclear Kemmerer en Wyoming, en la que se va a construir un reactor rápido (NATRIUM) refrigerado por sodio de 840 Mwt (345 Mwe), conectado a un sistema de almacenamiento de energía térmica de sales fundidas que le permite generar hasta 500 Mwe.

El reactor NATRIUM utiliza combustible U Zr HALEU[13] de 19,75 % de enriquecimiento. Opera a presión atmosférica y tiene mucha inercia térmica, debido a la piscina de sodio. La criticidad del reactor se controla fundamentalmente con barras de control y parada (figura 3).

En las notas finales se referencia el importante informe del comité asesor del Pleno de la NRC sobre esta solicitud y las actividades de prelicenciamiento de la NRC y la empresa solicitante Terrapower,

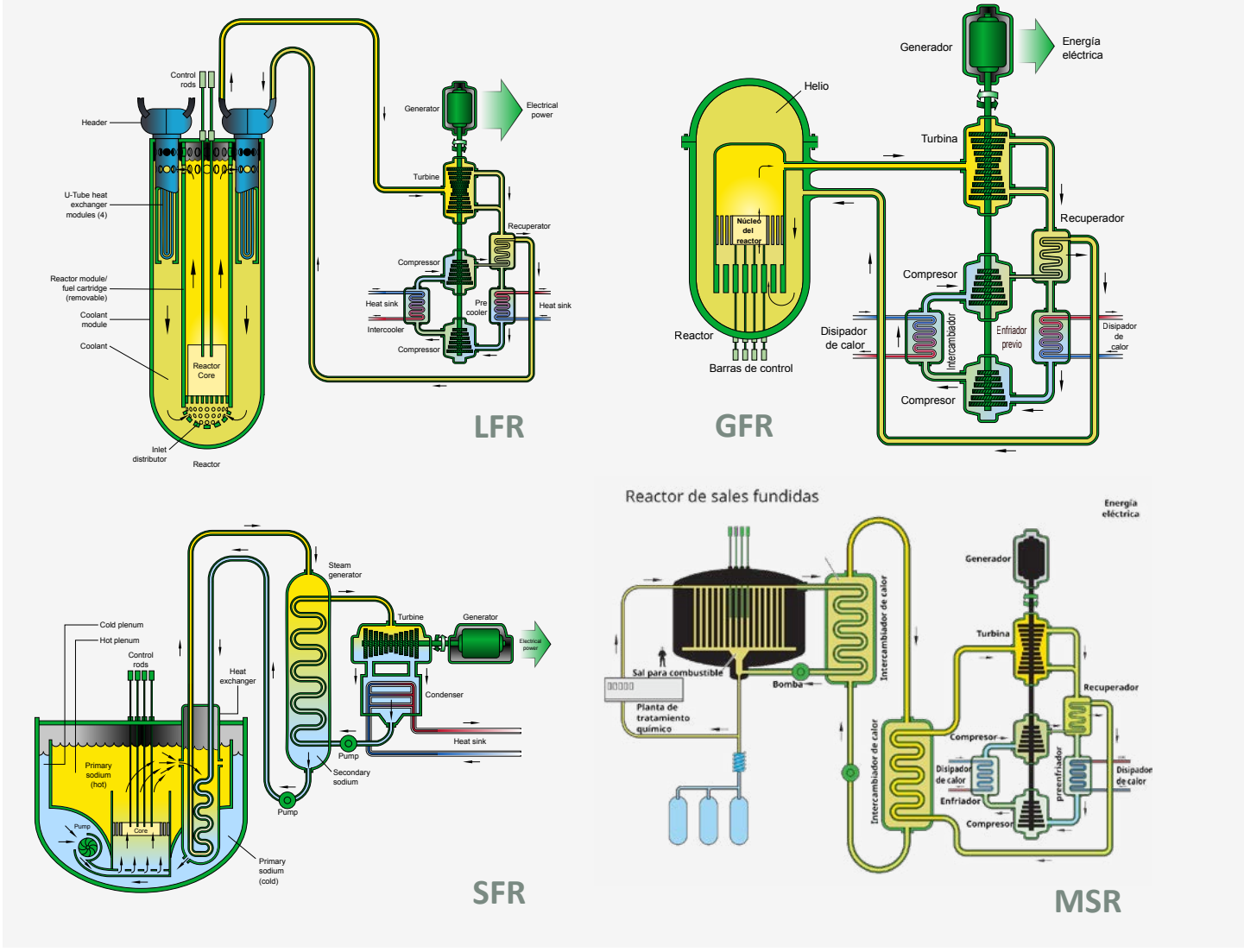



**Figura 1.** *Tecnologías GIF IV: GFR) reactores refrigerados por gas, (LFR) por plomo, (MSR) por sales fundidas, (SFR) por sodio, (SCWR) por agua en condiciones supercríticas y (VHTR) de muy alta temperatura.*

previas a las actividades propias de revisión de la solicitud sobre este reactor NATRIUM[14] [15] .

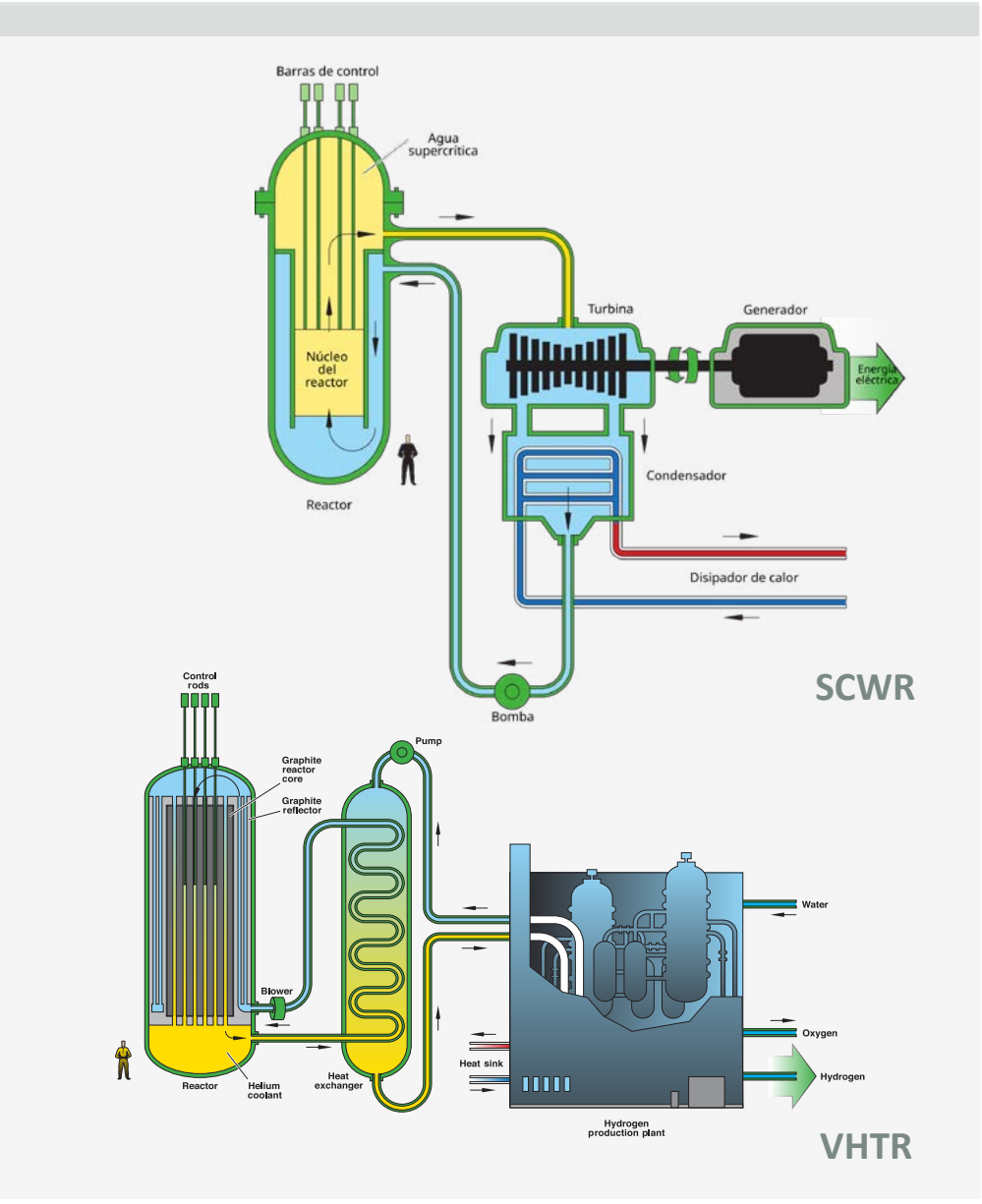
También se ha aprobado la licencia de construcción del reactor de prueba de baja potencia HERMES, de la empresa Kairos. Se trata de un reactor de sales fundidas con combustible TRISO y potencia térmica de 35 Mwt, que servirá para demostrar la viabilidad de esta tecnología. Como nota adicional, la NRC ha concedido el permiso de construcción de un reactor de sales fundidas de investigación de 1 Mwt en la Universidad de Abilene en Tejas.

Sin embargo, lo más significativo en este contexto son las más de treinta solicitudes de certificación de diseño que se encuentran en la etapa de prelicenciamiento[16] [17], actualmente en curso en la NRC.

Por su parte, el regulador nuclear francés, L'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR) ha adaptado sus procedimientos para SMR[18] y tiene en proceso de licenciamiento diez diseños de diferentes tecnologías[19] (sales fundidas, metales líquidos, alta temperatura, etc.).

## Características técnicas y aspectos regulatorios

A continuación se abordan de forma genérica retos y desafíos que los SMR suponen para la regulación nuclear: la aplicación de una regulación informada por el riesgo al análisis de seguridad de SMR, metodologías de cálculo del término fuente y de los radios de las zonas de planificación de emergencia, aplicación del concepto de *con-*




*tención funcional*, estándares aplicables a SMR, códigos de cálculo válidos para nuevos aspectos fenomenológicos y, finalmente, aspectos del transporte, operación remota y autónoma de micro reactores.

## 1. REGULACIÓN INFORMADA POR EL RIESGO

La mayoría de las centrales nucleares en operación de generación II y III, se diseñaron, construyeron y operan, aplicando una metodología determinista de análisis de accidentes, que consiste en postular un conjunto envolvente de escenarios de accidentes muy conservadores y aplicar una serie de hipótesis también conservadoras y conceptos como fallo único, redundancia, diversidad y margen de seguridad.

Con el paso del tiempo y la existencia de Análisis Probabilistas de Seguridad (APS) más detallados, se ha ido aplicando la regulación informada por el riesgo y basada en resultados –Risk Informed Regulation and Performance Based (RIPB)–, en la que se tiene en cuenta, para identificar los escenarios de accidentes, a partir de resultados de los análisis de los mismos, la clasificación de las estructuras, sistemas y componentes (ESC) en función de su importancia para la seguridad, el APS, junto con un análisis de defensa en profundidad y de diferentes aspectos programáticos (vigilancia de sistemas, pruebas, procedimientos de operación, formación, etc.).

Tanto en España como en países de su entorno se ha utilizado la RIPB en diversas aplicaciones, como modificaciones de diseño, e incluso en el caso del riesgo de incendio en la propia regulación. La novedad, en el caso de los SMR en EE. UU., es que se está aplicando la RIPB para realizar el análisis de accidentes y de seguridad de SMR.

Como referencia para la aplicación de la RIPB a los análisis de seguridad de SMR de cualquier tecnología, la NRC ha editado la guía reguladora RG 1.233, *Technology-inclusive, risk-informed, and performance-based (RIPB) approach for licensing advanced non-light water reactors (non-LWRs)*. Esta publicación recoge varios documentos de la industria nuclear americana, Nuclear Energy Institute (NEI), de referencia NEI 18-04 rev 1, *Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guidance for Non-Light Water Reactor Licensing Basis Development*, y NEI 21-07, *Technology Inclusive Guidance for Non-Light Water Reactors, Safety Analysis Report Content for Applicants Using the NEI 18-04 Methodology*.

La guía reguladora y los documentos NEI consideran un plano de coordenadas frecuencia y consecuencias radiológicas y una representación de los límites de dosis de la regulación norteamericana (figura 4) y de los objetivos de seguridad (*safety goals*) de la NRC de 1986[20]. Para un diseño determinado, las consecuencias radiológicas de los diferentes escenarios de determinada frecuencia deben encontrarse en una región alejada (con suficiente margen) de la línea límite. En España se aplicarían nuestros propios límites y los objetivos de seguridad del Reglamento de Seguridad Nuclear (Real Decreto 1400/2018), mediante el que se incorpora al derecho español la directiva europea 2014/87/Euratom.

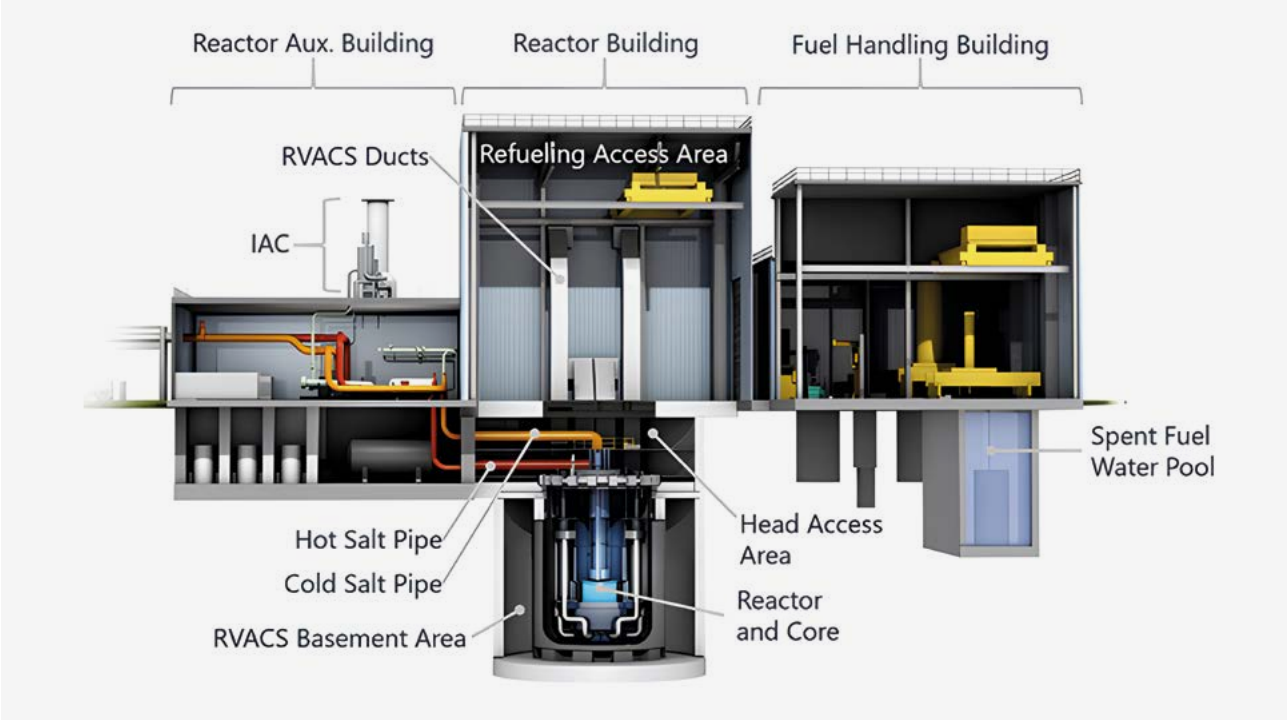



**Figura 3.** *Esquema del reactor rápido de sodio NATRIUM*

| HTR-PM | Características principales |
|---|---|
| Tipo | GCR |
| Energía por planta | 210 MWe |
| Modulos por planta | 2 (una turbina) |
| Presión del sistema | 7 MPa |
| Ciclo de combustible | 35 meses |
| Sistemas de seguridad | Pasivos |

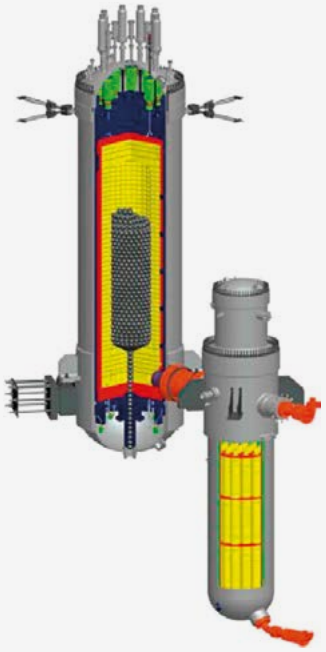


**Figura 2.** *Ejemplos de SMR: HTR-PM (CHN)*

Por otro lado, una vez clasificadas las ESC, es necesario aplicar a las que son importantes para la seguridad, los criterios generales de diseño que en España se encuentran en la Instrucción del Consejo IS 27[21] y en EE. UU. en el apéndice A del 10 CFR 50, *General Design Criteria for Nuclear Power Plants.*

Los criterios generales de diseño indicados, se desarrollaron para los reactores de agua ligera de generación II y III y no para los de otros refrigeradores y moderadores de neutrones b . Para abordar este asunto, la NRC desarrolló en 2018 la guía reguladora RG 1.232, *Guidance for developing Principal Design Criteria for Non-Light Water Reactors*, en la que se proporciona orientación a los diseñadores para definir los Principal Design Criteria (PDC), análogos a los criterios del apéndice A, pero adaptados a otras tecnologías de SMR.

La aplicación de la metodología RIPB a los análisis de seguridad de SMR en EE. UU., a pesar de su coherencia lógica, no ha estado exenta de problemas. El más significativo es la controversia dentro del propio regulador estadounidense sobre la aplicación del criterio de fallo único en las válvulas de aislamiento de las del sistema de refrigeración de emergencia (ECCS) del SMR NuScale.

En este SMR, el sistema de refrigeración de emergencia (ECCS) es un sistema pasivo constituido por tres válvulas de venteo de vapor y dos válvulas de recirculación del reactor, a través de las cuales entra nuevamente en el núcleo el vapor condensado. Estas válvulas están situadas, respectivamente, en la cabeza de la vasija del reactor y en el lateral de la misma. Cada una de estas cinco válvulas está constituida a su vez, por varias válvu-

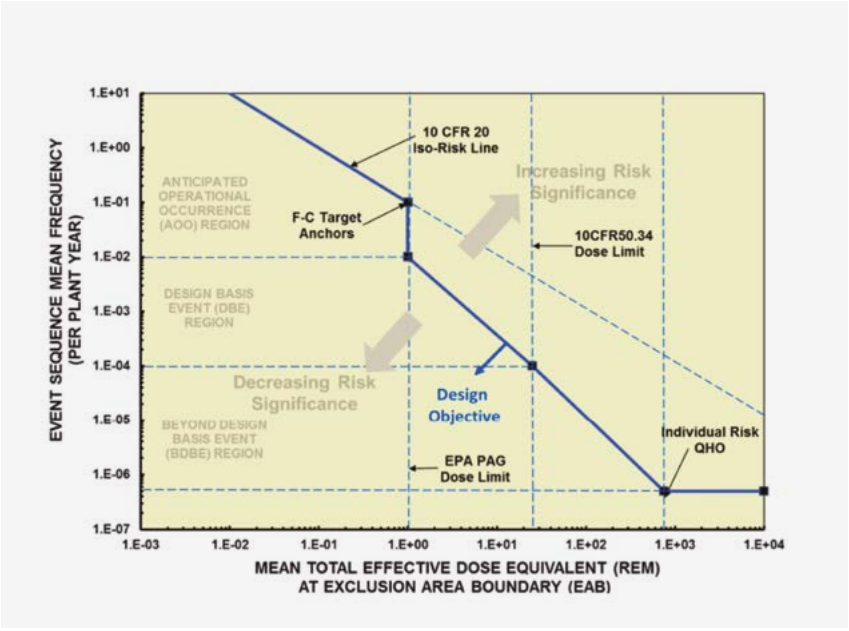



**Figura 4.** *Ejemplo de curvas frecuencia vs consecuencias radiológicas de NEI 18-04 para los diferentes tipos de escenarios: transitorios (AOO), sucesos base de diseño (DBE) y más allá de la base de diseño (BDBE)*

las con funciones específicas, destacando dos de ellas: la válvula principal a través de la cual pasa el vapor o el líquido condensado y las denominadas "Inadvertent Actuation Block" (IAB), encargadas de impedir o permitir el funcionamiento de la válvula principal en función de la presión diferencial entre la vasija del reactor y la vasija exterior o de "contención". El cuerpo técnico de la NRC consideró que, dada la complejidad de las válvulas de aislamiento IAB y la posible pérdida de refrigerante en caso de su apertura indeseada en operación, era necesario aplicar a las mismas el criterio de fallo único (documento SECY 19-0036, de 11 de abril de 2019), mientras que el Pleno de la NRC (documento SRM-SECY-19-0036[22], de julio de 2019), rechazó la posición del cuerpo técnico con base en la aplicación de resultados de RIPB.

Otro aspecto a considerar por los reguladores es la propia clasificación de las ESC de la metodología americana NEI 18-04, que además de la actual *seguridad* (*safety*) y *no seguridad* (*non-safety*), incorpora una tercera clase, *non safety related with special treatment*: aquellas necesarias para realizar funciones importantes desde el punto de vista del riesgo.

La clasificación de ESC es relevante, porque a aquellas que son de seguridad les aplican los criterios de garantía de calidad del apéndice B del 10 CFR 50[23]. Las guías reguladoras con una metodología aceptable para cumplir esos criterios[24] se basan en el estándar ASME NQA-1, Nuclear Quality Assurance Certification Program, fundamental para la industria nuclear. Actualmente, hay un debate abierto entre la industria nuclear estadounidense y la NRC sobre la sustitución de este estándar por la ISO 9001[25].

## 2. CÓDIGOS Y ESTÁNDARES TÉCNICOS APLICABLES A SMR

En la base de la pirámide normativa reguladora hay códigos y estándares de diferentes disciplinas técnicas. En las centrales nucleares españolas y de otros países, se utilizan muchos códigos y estándares de la American National Standards Institute (ANSI)[26]. Ejemplos de estos estándares son: ASTM (American Society for Testing and Materials) sobre materiales; NFPA (National Fire Protection Association), relacionados con protección contra incendios; ASME (American Society of Mechanical Engineers), sobre ingeniería mecánica; ASCE (American Society of Civil Engineers) utilizados en ingeniería civil, e IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sobre potencia eléctrica, energía, telecomunicaciones e inteligencia artificial.

En algunos aspectos técnicos, no hay o es necesario modificar los estándares existentes y, para ello, reguladores como la NRC y el canadiense CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission) están colaborando en la iniciativa de armonización Advanced Reactor Codes and Standards Collaborative (ARCSC). A nivel mundial, la colaboración de reguladores en esta tarea se canaliza, fundamentalmente, a través de la iniciativa NHSI de l OIEA.

Sin embargo, como el proceso de desarrollo o modificación de estándares es lento, la industria de EE. UU. ha propuesto –en discusión con la NRC– utilizar estándares de otras industrias y cambiar, de una regulación prescriptiva, a una regulación RIPB que proporcione un adecuado nivel de seguridad.

## 3. CÓDIGO DE CÁLCULOS VALIDADOS PARA LA FENOMENOLOGÍA DE LOS SMR

La mayoría de los códigos de simulación de las centrales de II y III/III+ se aplican a la fenomenología de reactores LWR. Para disponer de códigos de simulación aplicables a las fenomenologías de otras tecnologías non-LWR, tanto reguladores como el OIEA (NHSI) y la NEA, han emprendido tareas concretas.

Una referencia importante es el documento de la NRC (2016), *Vision and Strategy: Safely Achieving Effective and Efficient Non-Light Water Reactor Mission Readiness*[27], que especifica con planes a corto, medio y largo plazo tareas para obtener la capacidad de simulación necesaria[28].

Por otro lado, varios reguladores están trabajando en la identificación de fenómenos físico-químicos específicos para cada diseño y su clasificación, en lo que se conoce como Phenomena Identification and Ranking Tables (PIRT) para SMR non-LWR, en términos similares a lo establecido para LWR en la guía reguladora RG 1.203, *Transient and Accident Analysis Methods*.

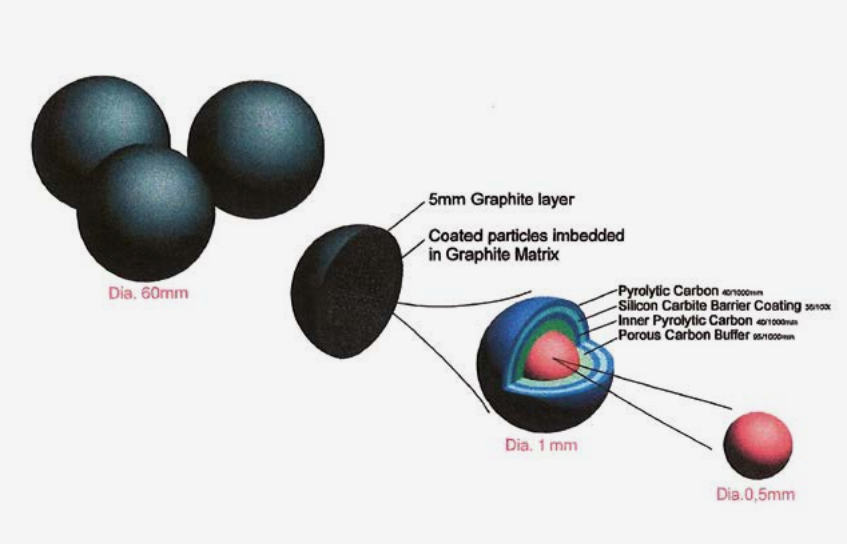



**Figura 5.** *Partículas de TRISO en matriz de grafito*

La iniciativa NHSI del OIEA contempla una plataforma denominada NEXSHARE que, básicamente, es un foro global para que organizaciones interesadas puedan colaborar y compartir resultados de experimentos y validación de códigos. También en la NEA se creó en 2021 el grupo de trabajo dentro de EGSMR (Expert Group on Small Modular Reactors), entre cuyas tareas figura la de identificar y recopilar PIRT para SMR y resultados de la validación de códigos para diferentes tecnologías de SMR.

## 4. TÉRMINO FUENTE

Un aspecto clave en la seguridad de los SMR, incluidos los non-LWR, es la determinación del término fuente, es decir, la fracción del inventario radiactivo del núcleo que, en caso de accidente, puede escapar a las diferentes barreras (vaina de combustible, circuito primario y contención) y llegar al exterior[29].

La determinación del término fuente permite conocer las consecuencias radiológicas de accidentes y, por lo tanto, verificar el cumplimiento de la regulación[30]. También es fundamental para determinar el área alrededor del reactor. Para esto es necesario tomar medidas de protección sobre la población circundante de cara a protegerla de los efectos de la radiación. Esta área o zona alrededor del reactor es la que se conoce como EPZ (Emergency Planning Zone).

En los reactores de generación II y III actuales, en España y EE. UU se aplica para la determinación del término fuente la guía reguladora RG 1.183, *Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design-Basis Accidents at Nuclear Power Reactors*, en la que se indican los accidentes a considerar, las hipótesis relativas al crédito sobre el funcionamiento de sistemas, etc.

Algunos reguladores, como la NRC, han abordado el problema de cómo determinar el término fuente en non-LWR. El regulador americano, en el documento SRM-SECY 93-092[31], considera aplicable la metodología tradicional de la RG 1.183, siempre que se conozca bien el funcionamiento y fenomenología del reactor en operación normal, transitorios y accidentes, y siempre que se disponga de datos y conocimiento sobre el comportamiento del combustible y el transporte de productos de fisión a través de las diferentes barreras en las secuencias accidentales consideradas en el diseño en cuestión. Como se ha indicado, hay varias iniciativas de validación de códigos de cálculos para las fenomenologías de los SMR[32].

La metodología RIPB de NEI 18-04 mencionada, en relación con el término fuente, aplica lo indicado por la NRC en SRM-SECY 93-092.

Hasta la fecha, la NRC ha aprobado las metodologías de cálculo del término fuente para el SMR NuScale en 2019 y 2025 para las dos versiones existentes, respectivamente. También ha aprobado, en junio de 2025, la metodología de cálculo del término fuente para el SMR de Terrapower NATRIUM[33].

## 5. NUEVOS COMBUSTIBLES. TRISO

Muy relacionado con el término fuente está la capacidad de los nuevos combustibles TRISO para retener los productos de fisión en caso de accidente y, por tanto, reducir el término fuente.

El combustible TRISO (acrónimo de *TRi-structural ISOtropic*), en su forma más habitual, está constituido por partículas formadas por sucesivas capas de carburo de silicio que encierran un núcleo con óxido de uranio o carburo de silicio enriquecido. Entre el núcleo y las sucesivas capas hay un espacio *buffer* para acomodar productos de fisión gaseosos. Estas partículas tienen un diámetro menor de 1 mm y, en su forma más común, cientos de estas partículas se introducen en una matriz de grafito (moderador) que constituye cada uno de los *pebbles* de varios centímetros (figura 6)[34].

El combustible TRISO en el SMR HTR-PM que está operando en China desde 2023 utiliza *pebbles*, pero otros diseños utilizan TRISO de otras formas (prismáticas, etc.). La figura 5 muestra diseños de SMR que utilizan TRISO.

La característica fundamental de TRISO para la seguridad de los SMR es su elevado punto de fusión, superior a los 1800 ºC.

En 2019, el Electric Power Research Institute (EPRI) presentó a la NRC, para su revisión, el documento *Uranium Oxycarbide (UCO) Tristructural Isotropic (TRISO) Coated Particle Fuel Performance, Topical Report EPRI-AR-1(NP)*, en el que se detallan los criterios de funcionamiento y límites de diseño de TRISO basados en los experimentos realizados en el Laboratorio Nacional de Argonne (ANL) de Estados Unidos, con enriquecimientos de uranio entre el 5 % y 20 %. Este documento fue revisado y aceptado




Figura 6. *Diseños de SMR que utilizan TRISO.*

por la NRC[35] para que pudiera ser incorporado en los análisis de seguridad de las solicitudes de los diferentes diseñadores.

Las características de este combustible lo hacen muy atractivo para el *deployment* de SMR, por lo que aunque actualmente hay varios fabricantes, la NRC se encuentra en fase de licenciamiento de la instalación TRISO-X[36] de la empresa X-Energy para fabricar TRISO a gran escala[37,38].

## 6. CONTENCIÓN FUNCIONAL

Teniendo en cuenta el menor término fuente y, por tanto, las consecuencias radiológicas de accidentes, algunos tecnólogos están aplicando el concepto de *contención funcional,* con el que se pretende sustituir la contención tradicional de hormigón armado por una combinación de barreras que realicen su función, es decir, impidan la liberación de productos de fisión en caso de accidente.

Tanto la regulación española[39] como la americana[40] y los requisitos de diseño para centrales nucleares del OIEA recogidos en el SSR 2/1 rev. 1, *Safety of Nuclear Power Plants: Design*, establecen la necesidad de disponer de un sistema de contención con capacidad de confinar los radionucleidos liberados en caso de accidente, proteger el reactor frente a sucesos externos y ofrecer blindaje contra la radiación en condiciones de accidente.

En el caso de EE. UU., la NRC, en su documento SECY 18-0096, acepta la aplicación del nuevo concepto de contención funcional. También en el marco del OIEA, varios reguladores[41] están colaborando en la utilización del mismo concepto[42].

## 7. PLANES DE EMERGENCIA

Otra consecuencia muy importante de tener un término fuente muy reducido es la disminución e incluso eliminación de los planes de emergencia exteriores debido a las bajas consecuencias radiológicas de los accidentes postulados.

Tradicionalmente, los radios de las zonas de planificación de emergencia (EPZ), en las que hay que tener previstas medidas para evitar dosis por exposición e ingestión, se han establecido considerando una colección de sucesos iniciadores extraídos sobre todo del análisis de accidentes, utilizando determinados modelos de dispersión.

En España, al igual que en países de su entorno, hay una primera zona (zona 0), en la que el titular es responsable de tomar las medidas convenientes de acuerdo con su Plan de Emergencia Interior: radio de la *zona bajo control del explotador*[43] (ZBCE). A continuación, hay un Plan de Emergencia Exterior, en el que intervienen instituciones del Estado, previsto, por un lado, para una zona 1, de 10 km de radio y dividida en subzonas, en las que las medidas de protección (confinamiento, profilaxis y evacuación) en función de los niveles de dosis efectiva evitable, están destinadas a prevenir dosis por exposición y, por otro, para una segunda zona, de 30 km de radio, en la que el objetivo es evitar dosis fundamentalmente por ingestión con medidas como: albergue temporal, realojamiento permanente o evacuación (figura 7)[44].

El estándar del OIEA GSR Part 7[45] detalla la metodología para determinar los radios de las diferentes zonas de planificación de emergencias en función de las consecuencias radiológicas. La regulación española es coherente con este estándar.

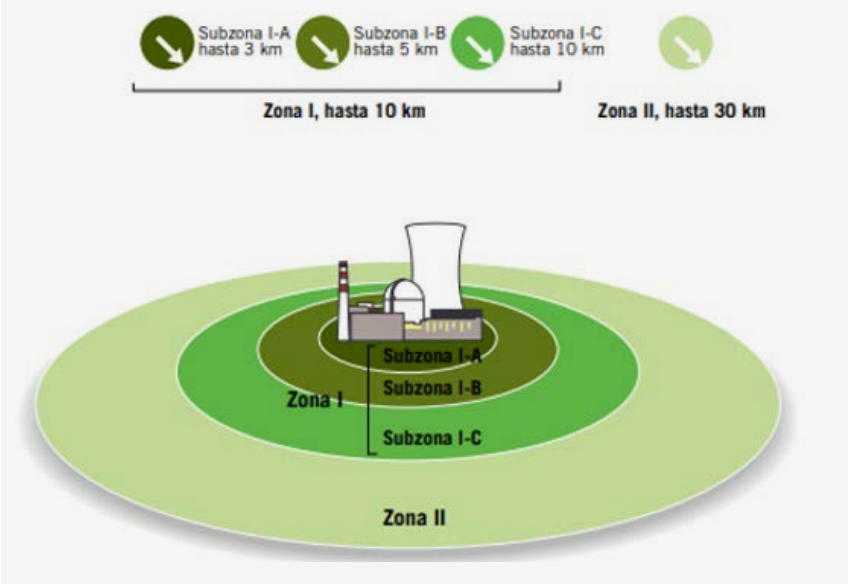



Figura 7. *Zonas de planificación de emergencia*

El grupo de trabajo internacional del OIEA formado por varios reguladores SMR, Regulators´Forum on Emergency Planning zones, considera que es necesario considerar las características innovadoras de seguridad de los SMR para determinar los radios de estas zonas.

Por otro lado, en EE. UU., la metodología RIPB permite utilizar criterios de riesgo para determinar los radios de las zonas de emergencia. La guía reguladora Regulatory Guide 1.242, *Performance-Based Emergency Preparedness for Small Modular Reactors, Non-Light-Water Reactors, and Non-Power Production or Utilization Facilities,* detalla el procedimiento aceptable para la NRC.

La utilización de esta alternativa RIPB permitirá establecer radios de las zonas de emergencia mucho menores que los actuales, limitados incluso a la ZBCE. Por ejemplo, en el reciente permiso de construcción de la central de Kemperer (Wyoming), ya mencionado, el informe final de evaluación[46] indica que el radio de plan de emergencia exterior alrededor de la central es de 400 m. Sobre este permiso, la NRC ha concluido que la metodología para la determinación de las zonas de emergencia es adecuada. El detalle concreto de la aplicación se determinará en la evaluación de la solicitud de operación.

En 2023, la NRC aprobó la metodología presentada por NuScale e incluida en la certificación del diseño[47] (figura 8) para determinar las zonas de planificación de emergencia[48].

Por último, en relación con los diseños de reactores de potencia eléctrica menor de 5 Mwe, conocidos como micro reactores y previstos para zonas remotas o sin acceso a una red exterior, presentan desafíos reguladores en relación con el transporte[49], la carga del núcleo en fábrica[50], la operación remota autónoma o semiautónoma[51] o de proliferación y salvaguardias. También el interesante uso de SMR para utilizar combustible gastado como combustible y reducir su radiotoxicidad, al mismo tiempo que se genera electricidad, presenta aspectos interesantes sobre el *back-end* del ciclo de del combustible, a los que los reguladores afectados deberán prestar atención.

Puede concluirse que las mejoras e innovaciones en la seguridad de algunos diseños de SMR han motivado que, para aprovecharlas, reguladores nucleares similares al CSN, estén adaptando sus procedimientos de licenciamiento e incluso la regulación. Este proceso es lento y complejo y requiere un trabajo intenso y focalizado en la seguridad del regulador, tecnólogos, organizaciones de investigación, etc., que permita una familiarización y conocimiento tecnológico muy detallado por parte del regulador.

1 La comunidad internacional define como SMR aquellos reactores nucleares modulares, de cualquier tecnología, con una potencia inferior a 300 Mwe, al entenderse esta potencia como adecuada para redes eléctricas no muy desarrolladas.

2 De forma general, se pueden distinguir las cuatro generaciones de reactores nucleares comerciales siguientes: a) Generación I, se trata de prototipos y plantas piloto a escala de prueba de conceptos y desarrollos de ingeniería; b) Generación II, a este grupo pertenecen la mayoría de los reactores comerciales de producción de energía eléctrica; c) Generación III, son los reactores que incluyen en sus diseños las medidas de seguridad derivadas de los análisis de los accidentes de Three Mile Island (TMI) en 1979 y Chernóbil, en 1986. Los reactores de generación III+ incluyen además sistemas de seguridad pasivos, y d) Generación IV, son reactores de diseños innovadores.

3 Small Modular Reactor Technology Catalogue, 2.ª edición, enero de 2025.

4 NEA small modular Reactor Dashboard, 3.ª edición, julio de 2025.

5 Todo el circuito primario, incluyendo lazos de refrigeración, presurizador, bombas del primario si son necesarias, etc., se encuentran dentro de la vasija del reactor.

6 En la NEA, se creó en el año 2000 el grupo GIF IV, formado por Canadá, China, Francia, Japón, Corea, Sudáfrica, Rusia, Suiza, Estados Unidos y EURATOM, cuyo objetivo era identificar necesidades de investigación en los reactores de cuarta generación. Tras analizar más de cien diseños, se seleccionaron las seis tecnologías de cuarta generación indicadas.

7 Frente a presiones de PWR de 157 bares en el circuito primario, hay nuevos diseños que funcionan a presiones prácticamente atmosféricas.

8 Nuclear Harmonization Safety Initiative (NHSI). Esta iniciativa tiene dos líneas de trabajo fundamentales: la reguladora (Regulatory Track) y la industrial (Industry Track). En la primera se pretende, a través de la colaboración entre reguladores, identificar aspectos de seguridad comunes y proponer recomendaciones para su resolución. En la línea industrial se analizan los procesos industriales para facilitar el deployment de SMR: cadena de suministro, códigos y estándares, inspección en servicio, modularización, etc. Véase: https://nucleus.iaea.org/sites/smr/SitePages/Nuclear-Harmonization-and-Standardization-Initiative.aspx

9 Expert Group on Small Modular Reactors (EGSMR). Véase: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_79842/expert-group-on-small-modular-reactors-egsmr

10 NEA Roadmaps to New Nuclear 2025. A forum for governments and industry to succeed with nuclear new build.

11 Primera conferencia internacional sobre SMR (21-25 de octubre de 2024). Discurso disponible en: https://streaming.iaea.org/24681 (a partir minuto 34).

12 El NuScale es un reactor modular, en el caso del diseño de 50 Mwe se contempla

una central con 12 módulos (600 Mwe) en una piscina de agua. En el diseño de 77 Mwe se contemplan seis módulos en la piscina (potencia total 462 Mwe).

13 El combustible HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) es un tipo de uranio enriquecido entre el 10 % y 20 % en U-235.

14 Véase: https://www.nrc.gov/docs/ML2531/ML25311A150.pdf

15 Véase: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/who-were-working-with/pre-application-activities/natrium

16 Pre-Application activities for SMR. Véase: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/who-were-working-with/pre-application-activities

17 El procedimiento de prelicenciamiento en la NRC consta de las siguientes fases: a) carta de intenciones; b) referencia del proyecto y tasas; c) Regulatory Engagement Plan (Industry Guideline for Development of a Regulatory Engagement Plan); d) reunión de inicio; e) Pre-application activities para conocimiento tecnológico por el regulador, y f) reunión de difusión pública (cerca emplazamiento donde se pretende construir y operar el reactor). Véase: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/new-app/general-guidance/pre-app-process

18 Véase: https://regulation-oversight.asnr.fr/oversight/small-modular-reactors/asnr-adapts-to-innovative-smrs

19 Véase: https://regulation-oversight.asnr.fr/oversight/small-modular-reactors/the-small-modular-reactors-smr#different-smr-sectors-in-france

20 51 FR 30028. Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants; Policy Statement. Véase: https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/policy/51fr30028.pdf.

21 En España, Instrucción IS-27, revisión 1, de 14 de junio de 2017, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios generales de diseño de centrales nucleares.

22 Véase: https://www.nrc.gov/docs/ML1918/ML19183A408.pdf

23 Appendix B to Part 50. Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants.

24 RG 1.28 Quality Assurance Program Criteria (Design and Construction) y RG 1.33 Quality Assurance Program Requirements (Operation).

25 La posición de la industria americana figura en el documento de NEI del 14 de julio de 2025. Supplement to the NEI Proposal Paper "Regulation of Rapid High-Volume Deployable Reactors in Remote Applications (RHDRA) and Other Advanced Reactors. Véase: https://www.nrc.gov/docs/ML2519/ML25195A307.pdf

26 Estos códigos y estándares se endosan en EE. UU. con el 10 CFR 50.55 a. En España, mediante Instrucción Técnica Complementaria.

27 Véase: https://www.nrc.gov/docs/ML1635/ML16356A670.pdf

28 Muchos de los códigos de licenciamiento utilizados por la NRC y también en el CSN y titulares de las instalaciones españolas como TRACE, SCALE o MACCS se están aplicando a SMR de diferentes tecnologías.

29 El término fuente se expresa en función de las fracciones del inventario de productos de fisión que se pueden liberar desde el combustible al exterior, indicando su forma físico- química y el momento de su liberación. El cálculo del término fuente depende de muchos factores: eficiencia del ciclo, composición y enriquecimiento del combustible, etc.

30 En España, la Instrucción del CSN IS 37 sobre análisis de accidentes base de diseño en centrales nucleares, contiene en el artículo 11, los criterios de aceptación radiológicos.

31 SRM-SECY-93-092. Issues pertaining to the advanced reactor (PRISM, MHTGR and PIUS) and CANDU 3 designs and their relationship to current regulatory requirements.

32 En EE. UU., el volumen 3 del documento de la NRC mencionado anteriormente Non-Light Water Reactor (NonLWR) Vision and Strategy, Volume 3-Computer Code Development Plans for Severe Accident Progression, Source Term, and Consequence Analysis, aborda el problema de la fenomenología de los tipos de accidentes en función de la tecnología y las capacidades de los códigos de cálculo para determinar el término fuente de los non-LWR. Códigos de cálculo término fuente de la NRC para non LWR. Véase: https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/references/nuclear-power-reactor-source-term#smrs

33 Informe final de evaluación de la metodología de cálculo de término fuente del reactor TERRAPOWER NATRIUM.

34 Bruna et al. Overview of Generation IV Reactor Designs. Safety and Radiological Protection Considerations. IRSN 2012.

35 Final Safety Evaluation Uranium Oxycarbide (UCO) Tristructural Isotropic (TRISO) Coated Particle Fuel Performance: Topical Report EPRI-AR-1 (NP).

36 Véase: https://www.federalregister.gov/documents/2025/10/23/2025-19646/triso-x-llc-special-nuclear-material-license-application-for-the-triso-x-fuel-fabrication-facility

37 La regulación aplicada en EE. UU. es el 10 CFR 70 al tratarse de una fábrica de combustible y la referencia relativa al Estudio de Seguridad es el conocido NUREG 1520, Standard Review Plan for Fuel Cycle Facilities License Application.

38 El estado de licenciamiento en la NRC de esta instalación está disponible en: https://www.nrc.gov/info-finder/fc/triso-x/project-status.

39 nstrucción IS 27, sobre criterios generales de diseño de centrales nucleares.

40 Apéndice A del 10 CFR 50.

41 SMR Regulators Forum, Working Group on Design and Safety Analysis. Véase: https://www.iaea.org/sites/default/files/24/02/smr_rf_phase_3_report_-_containment_systems.pdf

42 En la RG 1.232. Guidance for Developing Principal Design Criteria for Non-Light Water Reactors, la NRC define la contención funcional como: «a barrier, or set of barriers taken together, that effectively limit the physical transport and release of radionuclides to the environment across a full range of normal operating conditions, AOOs, and accident conditions».

43 Zona bajo control del explotador (ZBCE): área en la que se ubica la instalación y terrenos circundantes en la que el titular puede determinar las actuaciones libremente, por razones de propiedad o de acuerdo con sus propietarios. Las dimensiones de esta zona se establecen en las condiciones de licenciamiento de cada instalación y están directamente relacionadas con los resultados del análisis de accidentes incluidos en su Estudio de Seguridad (referencia: Instrucción del Consejo nº 44 de 26 de febrero de 2020).

44 Véase: https://www.csn.es/documents/10182/914805/Emergencia%20en%20centrales%20nucleares

45 IAEA GSR Part 7. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency

46 Véase: https://www.nrc.gov/docs/ML2532/ML25329A252.pdf

47 Véase: https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/19/2023-00729/nuscale-small-modular-reactor-design-certification

48 NuScale Topical Report, TR-0915-17772. Methodology for establishing the Technical Basis for Plume Exposure Emergency Planning Zones at Nuscale Small Modular Reactor Plant Sites.

49 Para el transporte de estos micro reactores se aplicaría el estándar del OIEA Reglamento para el transporte seguro de material radiactivo del OIEA SSR-6 (rev. 1). En España, este documento es referencia para el transporte y, en este caso, sería un bulto tipo B con material fisionable. Entre la regulación aplicable para el transporte de micro reactores existe el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre) y varias instrucciones del CSN (n.º 34, 35, 38, 39 y 42).

50 De acuerdo con la regulación, esta carga en fábrica implicaría que el fabricante debería tener una autorización de explotación, lo que no tiene sentido. Para resolver este problema, reguladores como la NRC han introducido el concepto de features to preclude crtiticality (ref. SECY 24-008), que consiste en la utilización de elementos físicos para impedir la criticidad con el reactor cargado en fábrica.

51 Una referencia importante sobre esto es el workshop sobre Human Factors Research and Remote and Autonomous Operation, celebrado el 31 de enero y 1 de febrero de 2024. Disponible en: https://www.nrc.gov/docs/ML2517/ML25175A098.pdf

# Ciencia y superhéroes

## De la radiactividad a la genética, a través del imaginario heroico del siglo XX



Desde mediados del siglo XX, ciencia y cultura popular se han entrelazado en un diálogo constante. La radiactividad, la energía nuclear, la genética y la física teórica alimentaron buena parte del imaginario de los superhéroes. Explorar las raíces científicas y simbólicas de esta relación ayuda a comprender cómo los avances reales –y los temores colectivos– dieron forma a figuras que, bajo el disfraz del mito, reflejan aspiraciones y dilemas éticos de la modernidad.

Texto: **Nazario Segura**

El superhéroe es heredero del Prometeo que roba el fuego a los dioses: el conocimiento como poder y, a la vez, como riesgo. Mary Shelley reformuló esa tensión en *Frankenstein o el moderno Prometeo* (1818), donde el científico que transgrede los límites naturales paga el precio de su ambición. En el siglo XX, el filósofo Hans Jonas planteó en *Das Prinzip Verantwortung* (1979) la necesidad de una ética proporcional al alcance de la técnica. Mucho antes, François Rabelais había condensado la advertencia en su máxima «Ciencia sin conciencia no es más que ruina del alma». De Prometeo a los laboratorios atómicos, ciencia y ética comparten la misma frontera: la del poder y su control.

### Radiación y poder: de Curie a Hulk

El descubrimiento de la radiactividad natural por Henri Becquerel (1896) y el trabajo de Marie y Pierre Curie marcaron un punto de inflexión en la comprensión







## Atomic Man y la «edad atómica» del cómic

En la posguerra, un tramo del cómic estadounidense ha sido descrito como «edad atómica» (1946–1954) por la proliferación de motivos nucleares en tramas e iconografía. En ese clima cultural, Headline Comics (1945) presentó a Atomic Man (Adam Mann): un personaje que obtiene poderes tras ingerir accidentalmente agua con uranio-235 y exponerse a una máquina de alto voltaje. La historieta recurre incluso a un guante de plomo como recurso narrativo para «ocultar» o contener el poder nuclear. Más allá de su plausibilidad científica, el interés del personaje reside en su función simbólica: el átomo aparece como promesa de modernidad y, simultáneamente, como amenaza. Esa ambivalencia reaparece en héroes y villanos posteriores, incluidos *Doctor Solar: Man of the Atom* (1962) o el villano Radioactive Man, introducido por Marvel en *Journey into Mystery* (1963). ■

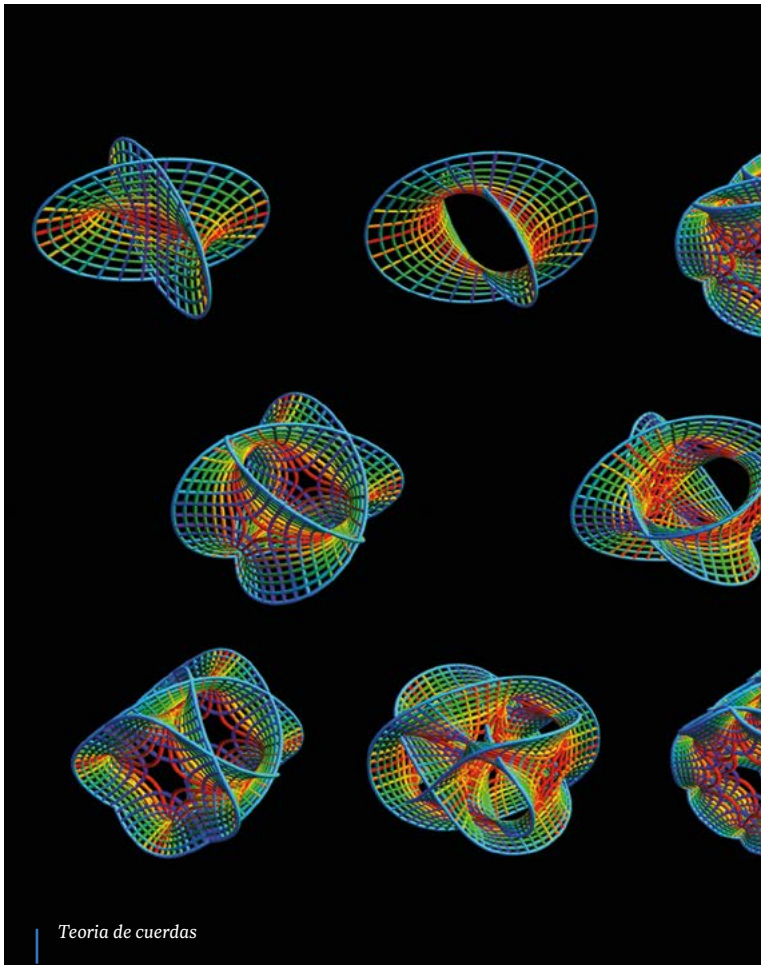
de la materia. Marie Curie acuñó el término «radioactividad» para designar la emisión espontánea de radiación por ciertos elementos y abrió un campo nuevo de investigación. En las primeras décadas del siglo XX, la fascinación por el átomo se extendió más allá del laboratorio: productos cosméticos, tónicos «curativos» y objetos de uso cotidiano con sustancias luminiscentes reflejaron un optimismo tecnológico que hoy se interpreta también como un caso histórico de mala evaluación del riesgo.

El siglo, sin embargo, conoció pronto su reverso. Las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki (agosto de 1945) provocaron, según estimaciones de la Radiation Effects Research Foundation (RERF), entre 90 000 y 166 000 muertes en Hiroshima y entre 60 000 y 80 000 en Nagasaki en los primeros meses tras los bombardeos, con incertidumbres inevitables por la destrucción de registros y las muertes posteriores asociadas a quemaduras, traumatismos y exposición a radiación ionizante. Desde entonces, el adjetivo «nuclear» encarna a la vez la promesa del progreso y la amenaza del aniquilamiento.

La cultura popular respondió a esa dualidad. El monstruo irradiado –del Godzilla cinematográfico (1954) al Increíble Hulk (1962)– simboliza el miedo a que el saber humano desborde sus límites. En términos físicos, la radiación gamma es radiación electromagnética ionizante de alta energía: su interacción con la materia viva produce ionizaciones, roturas en





*Teoria de cuerdas*

el ADN y daño tisular. Convertirla en «origen de poder» en la ficción es, por tanto, una metáfora de la ambivalencia del conocimiento: una fuerza capaz de curar o de destruir, según el contexto y los controles.

### Mutaciones, evolución y genética

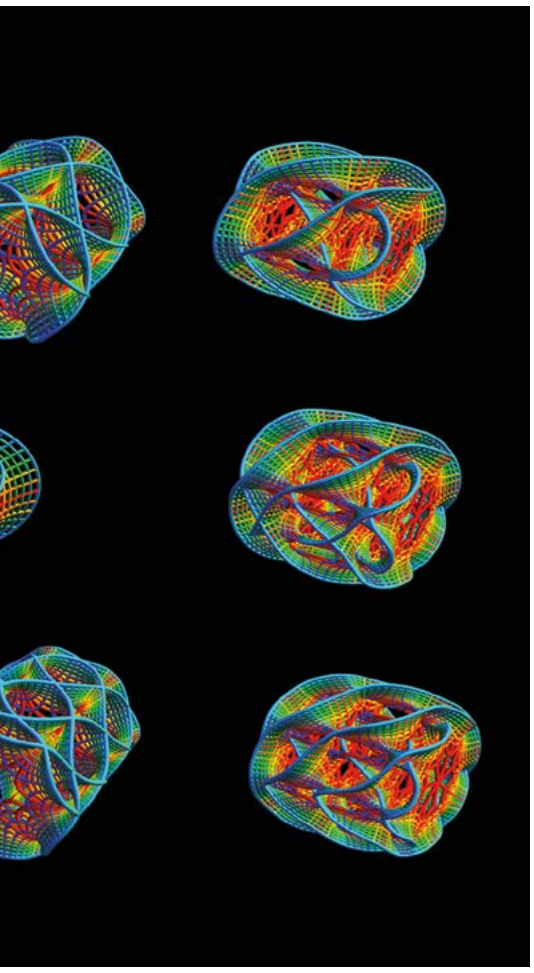
La publicación de *El origen de las especies* (Darwin, 1859) introdujo una visión dinámica de la vida: la diversidad como resultado de variación y selección. Un siglo después, la biología molecular dio un salto decisivo cuando James Watson y Francis Crick describieron la estructura de doble hélice del ADN (1953), apoyándose en los datos de difracción de rayos X obtenidos por Rosalind Franklin y Maurice Wilkins. Medio siglo más tarde, la culminación del Proyecto Genoma Humano (2003) consolidó la idea de que el código biológico podía ser leído, comparado y, con el tiempo, intervenido.

La cultura popular convirtió ese vértigo científico en argumento. Los X-Men dramatizan la mutación hereditaria como rasgo identitario y político; Spider-Man encarna, en clave de fábula, la ansiedad del cuerpo transformado tras un accidente asociado a la radiación; y Daredevil traduce a lenguaje heroico el miedo a la toxicidad industrial. No son «predicciones» científicas, sino alegorías del límite: cuándo la alteración biológica deja de ser accidente para convertirse en diseño.

La edición genética ha trasladado parte de ese límite a la realidad. La herramienta CRISPR-Cas9, descrita en 2012 por Emmanuelle Charpentier y Jennifer A. Doudna, permite realizar cortes dirigidos en ADN con elevada especificidad y ha transformado la investigación biomédica. A ello se suman las células madre pluripotentes inducidas (iPS), obtenidas por Shinya Yamanaka en 2006, que abren vías para estudiar enfermedades y desarrollar estrategias de medicina regenerativa. En ambos casos, el desafío no es solo técnico: el poder sobre la vida obliga a definir con rigor qué usos son aceptables, qué riesgos son tolerables y qué salvaguardas deben imponerse.

### Física avanzada y materiales imposibles

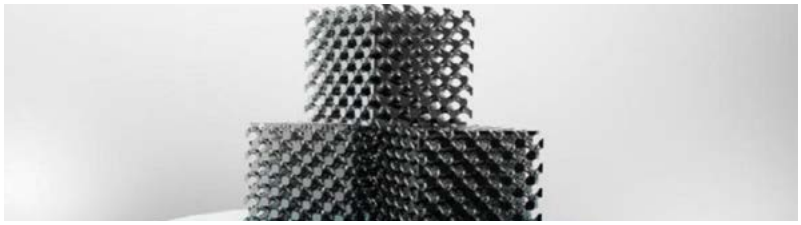
La física teórica llevó la imaginación humana más allá del átomo. En 1968, Gabriele Veneziano propuso una amplitud de dispersión para describir determinadas interacciones hadrónicas en el marco del entonces llamado modelo de resonancia dual. Con el tiempo, esa formulación se interpretó como la huella matemática de objetos unidimensionales (cuerdas) y se convirtió en uno de los puntos de partida históricos de la teoría de cuerdas. En las décadas siguientes, contribuciones de John Schwarz, Joël Scherk y Michael Green impulsaron el desarrollo de la teoría





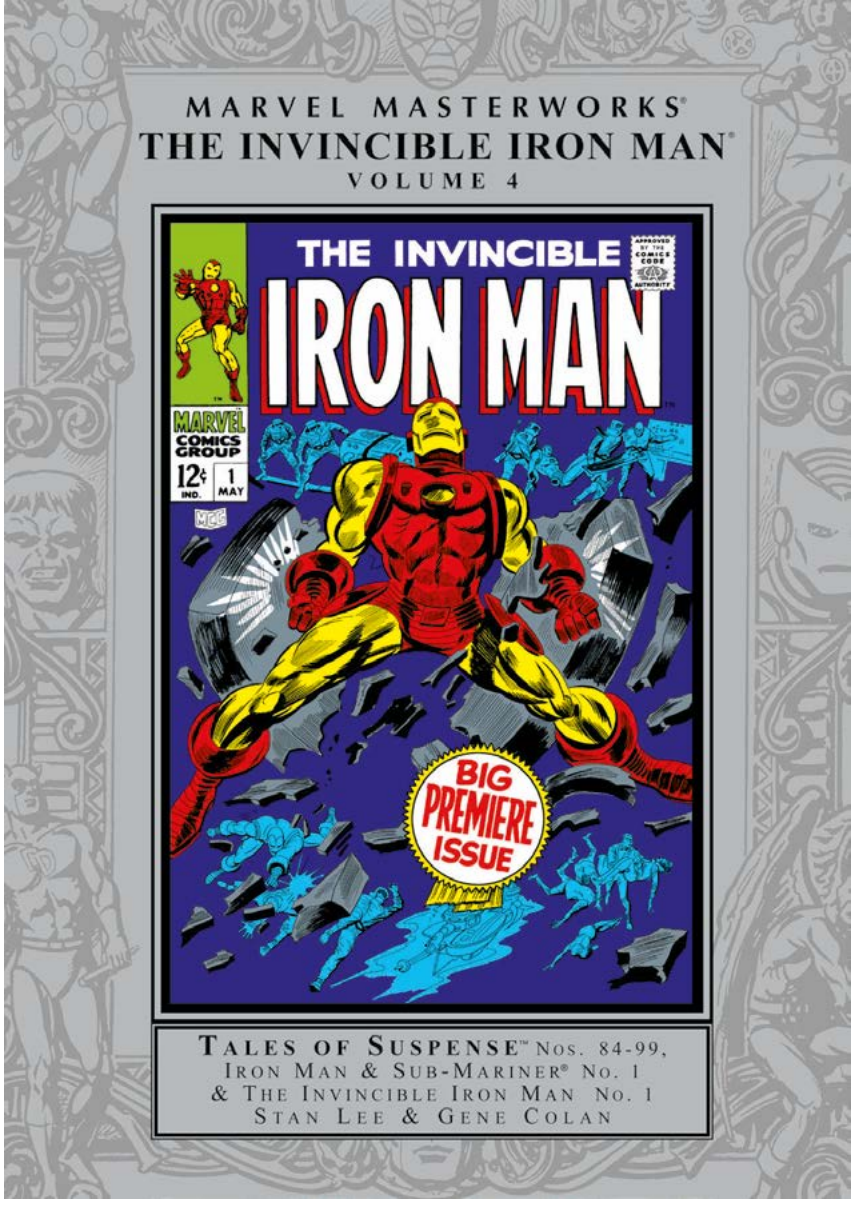

de supercuerdas; en 1995, Edward Witten propuso un marco unificador –la denominada teoría M– en el que las distintas teorías de supercuerdas pueden entenderse como límites de una teoría en once dimensiones.

En el terreno aplicado, la ciencia de materiales ha dado cuerpo a ficciones tecnológicas. El exoesqueleto de Iron Man exagera –con licencia narrativa– líneas reales de investigación en robótica *wearable*, materiales compuestos, actuadores y almacenamiento energético. El *vibranium* de Black Panther, por su parte, funciona como metáfora del «material total»: ultrarresistente, capaz de amortiguar impactos y de gestionar energía. En el mundo real no existe un equivalente único, pero sí familias de materiales avanzados (nanocompuestos, retículas ultraligeras o metamateriales) con propiedades emergentes diseñadas a partir de su estructura, más que de su composición química.



## «Materiales imposibles»: de la fantasía al laboratorio

La ficción imagina metales indestructibles, trajes autorreparables o blindajes «perfectos». La ingeniería real trabaja, en cambio, con compromisos: resistencia frente a peso, dureza frente a tenacidad, conductividad frente a estabilidad. Entre los ejemplos mejor establecidos están las aleaciones con memoria de forma, como el nitinol (Ni-Ti), descubierto en 1959 en el U.S. Naval Ordnance Laboratory: puede deformarse y recuperar su forma al variar la temperatura, y se usa hoy en dispositivos médicos e ingeniería. También existen materiales autorreparables: sistemas poliméricos capaces de recuperar parte de su integridad tras una fisura, mediante mecanismos químicos o microcápsulas que liberan agentes de curado. Por último, los metamateriales –estructuras con arquitectura diseñada a microescala– permiten obtener propiedades mecánicas ajustables o no triviales que dependen de la geometría tanto como del material de base. ■



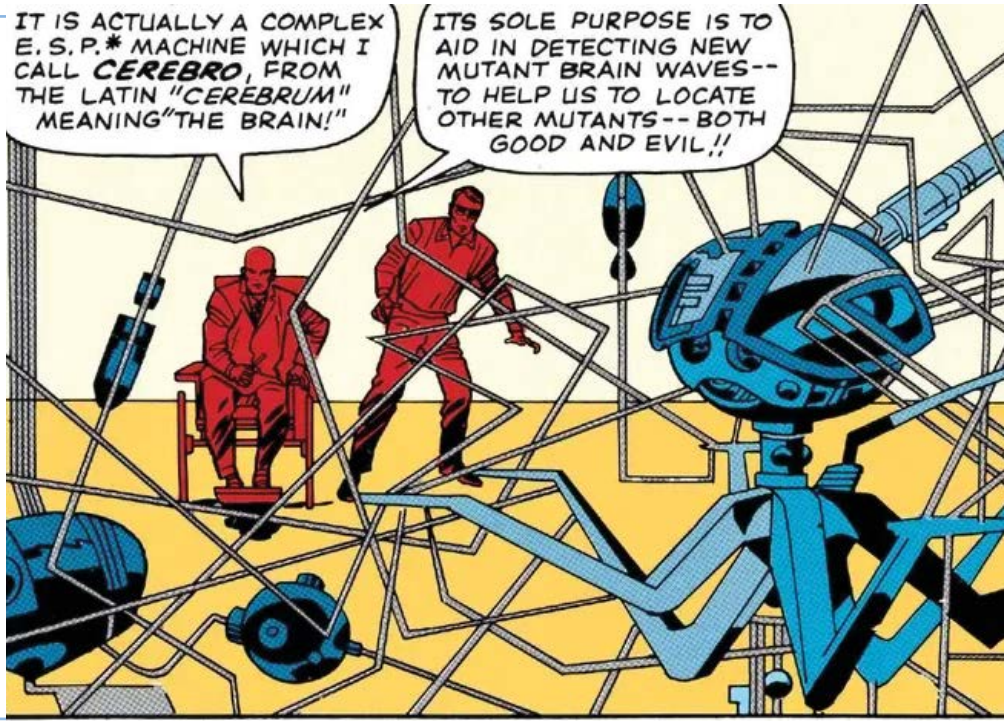

### Neurociencia y poder mental

El cerebro, último territorio del misterio, se ha convertido en protagonista de una nueva frontera tecnológica. La ficción anticipó esa ambición con figuras como el Profesor X, cuya telepatía simboliza la comunicación total. La investigación contemporánea trabaja con objetivos mucho más concretos, pero no menos transformadores: restaurar funciones perdidas por lesión o enfermedad.

En estudios con personas con tetraplejia, las interfaces cerebro-máquina (*brain-computer interfaces*, BCI) basadas en registros intracorticales han permitido controlar un cursor o un brazo robótico para ejecutar tareas de alcance y prensión. Estos logros, obtenidos en entornos experimentales y con muestras pequeñas, muestran una vía de rehabilitación y autonomía, pero también evidencian límites actuales: necesidad de calibración, estabilidad de señal, biocompatibilidad a largo plazo y ciberseguridad. Programas de agencias como DARPA han impulsado líneas de investigación orientadas a interfaces neuronales y sistemas neuroprotésicos con aplicaciones médicas.

## Del Profesor X al Laboratorio Neural

Las *brain-computer interfaces* (BCI) no «leen pensamientos» en sentido estricto: decodifican patrones neuronales asociados a intenciones motoras o a estados sensoriales entrenados en condiciones controladas. Su campo de aplicación más sólido es clínico: comunicación y control de dispositivos en personas con parálisis, y –en otras líneas– estimulación para modular síntomas neurológicos. El debate ético es inseparable de la ingeniería: privacidad de datos neuronales, consentimiento informado, equidad en el acceso, seguridad informática y definición de responsabilidades ante fallos. ■

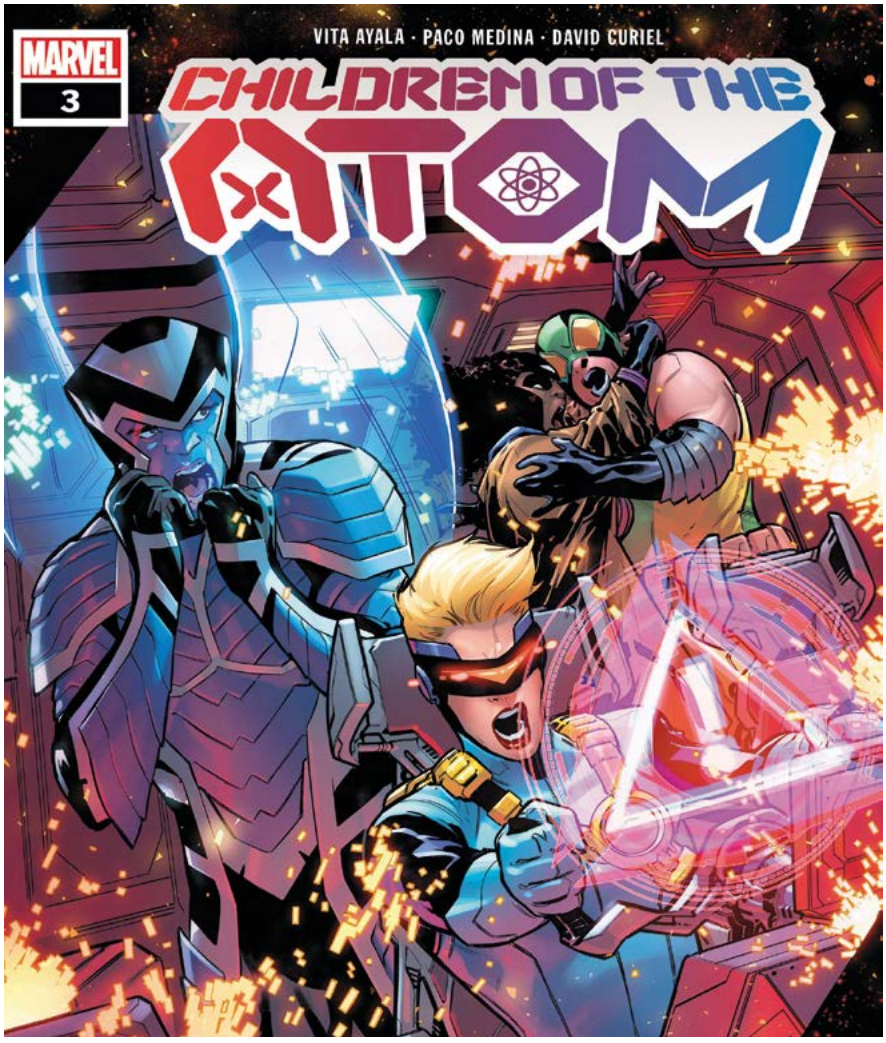


### Ciencia, mito y responsabilidad

El universo de los superhéroes funciona como un espejo cultural de la modernidad científica. La radiactividad, la ingeniería genética, los materiales avanzados o la neurotecnología no son solo recursos narrativos: son metáforas del poder humano sobre la naturaleza y de sus riesgos.

Ese poder no es abstracto. La historia del siglo XX mostró con crudeza que el conocimiento puede traducirse en destrucción masiva, pero también en medicina nuclear, radioterapia, diagnóstico por imagen y tecnologías que mejoran la seguridad industrial. En el ámbito nuclear, la lección es especialmente clara: la legitimidad social de cualquier aplicación depende de marcos robustos de seguridad, protección radiológica, transparencia y control regulatorio.

La divulgación rigurosa –incluida la que analiza la ciencia en la cultura popular– contribuye a esa legitimidad. Al poner en relación mito y laboratorio, el relato superheroico recuerda una verdad incómoda: la pregunta decisiva no es qué puede hacerse, sino bajo qué condiciones, con qué controles y con qué responsabilidades. ■







### Bibliografía


Boyer, Paul (1985). *By the Bomb's Early Light: American Thought and Culture at the Dawn of the Atomic Age*. Chapel Hill: University of North Carolina Press.

Bombara, Paula y Valenzuela, Andrés (2013). *Ciencia y superhéroes. Experimentos, hipótesis y villanos ¡al infinito y más allá!* Buenos Aires: Siglo XXI Editores.

Brake, Mark (2018). *The Science of Superheroes: The Secrets Behind Speed, Strength, Flight, Evolution, and More*. New York: Racehorse Publishing.

Coogan, Peter (2006). *Superhero: The Secret Origin of a Genre*. Austin: MonkeyBrain Books.

Fernández Sánchez, Javier (2022). *Motivos atómicos en el cómic de superhéroes de la edad atómica*. Tebeosfera: Cultura Gráfica.

Jiao, Pengcheng *et al*. (2023). «Mechanical metamaterials and beyond». *Nature Communications* 14:6004.

Kauffman, George B.; Isaac, Mayo I. (1996). «The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications». *The Chemical Educator*.

Radiation Effects Research Foundation (RERF) (s. f.). *How many people died in Hiroshima and Nagasaki?*.

White, Scott R. *et al*. (2008). *Autonomic Healing of Polymers*. MRS Bulletin.

Hochberg, Leigh R. *et al*. (2012). «Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm». *Nature*.

Collinger, Jennifer L. *et al*. (2012). «High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia». *The Lancet*. ■

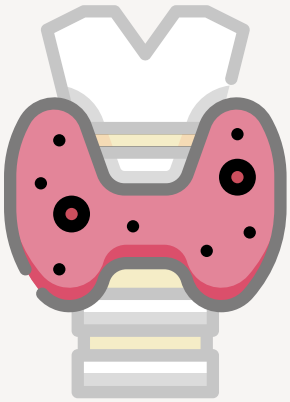
# Protocolo Nacional para la medida y evaluación de dosis de I-131 en población expuesta (adultos y niños) en situaciones de emergencia

Texto: **María Antonia López,** jefa de la Unidad de Dosimetría de Radiaciones del Ciemat

## Proyecto MEYER

### OBJETIVO

Elaborar un Protocolo Nacional para la determinación de I-131 en tiroides en población expuesta de distintas edades, en situaciones de emergencia radiológica o nuclear. Tiene su origen en la plataforma PEPRI de I+D en Protección Radiológica, a partir de un Convenio de I+D entre el CIEMAT (coordinador), Tecnatom/Westinghouse y Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)SN, y cuenta con la participación de otras entidades del ámbito universitario y hospitalario.



Se trata de ampliar las capacidades nacionales para la medida directa de radioyodo en tiroides en escenarios de exposición interna por incorporación accidental de I-131, donde se requiere un cribado rápido para identificar personas de mayor contaminación interna que precisen un seguimiento médico y dosimétrico.



El protocolo requiere la calibración de equipos espectrométricos (detectores NaI(Tl), HP Ge, otros), no espectrométricos (monitores de radiación, etc.) y gammacámaras de hospitales para una evaluación rápida del I-131 incorporado y retenido en la tiroides. Para ello, el CIEMAT fabricó una serie de maniquíes tipo cuello monolobulares con viales, conteniendo fuentes líquidas de Ba-133 y Cs-137 (emisiones fotónicas similares a las del I-131) que simulan la contaminación interna de I-131 en tiroides en niños de uno, cinco y diez años, y adultos. En general, siempre que la geometría de contaje y la sensibilidad de detección lo permitan, se elegirán tiempos cortos de medida y una distancia detector-tiroides de 10 cm, lo que implica menor dependencia de la eficiencia de detección respecto a la edad del individuo contaminado.



## FASES

El proyecto MEYER se desarrolló entre 2021 y 2025 en tres fases. Los maniquíes de calibración y la primera versión del protocolo de calibración estuvieron disponibles en la fase 1, para su aplicación en las instituciones participantes del proyecto. La versión final del protocolo para calibración y medida, junto con los maniquíes cuello y viales de Ba y Cs de actividad conocida (para calibración) y viales de actividad desconocida (para validación), se enviaron a una serie de instituciones invitadas, de interés para el proyecto, puesto que permiten mejorar las capacidades nacionales en caso de contaminación interna accidental por I-131.

## INVENTARIO

Es importante el inventario de equipos que se ha generado en el proyecto MEYER, gracias a todas las instituciones implicadas en la calibración y medida de I-131 en tiroides en las fases 1 y 2. Los equipos que son claramente adecuados para la determinación de I-131 en tiroides son los Contadores de Radiactividad Corporal (CRC) de los servicios de dosimetría interna autorizados por el CSN (QUICKY, DIYS, FASTSCAN, detectores NaI(Tl) y BE Ge en interior de cámara blindada) y las gammacámaras de hospitales, así como los captadores tiroideos. En el caso de equipos portátiles, instrumentación con base en monitores de radiación espectrométricos y no espectrométricos y monitores de contaminación han demostrado ser útiles para su uso en caso de necesitarse un cribado rápido en situaciones de emergencia.

## DOSIS

El protocolo también proporciona fracciones de retención y coeficientes de dosis dependientes de la edad utilizando los modelos biocinéticos y dosimétricos más recientes desarrollados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica para la evaluación de las dosis comprometidas en población expuesta según distintos grupos de edad. Estos datos dosimétricos se calcularon con el *software* PLEIADES de UKHSA (UK Health Security Agency UKHSA).

## MÁS INFORMACIÓN

# Mejoras en las nuevas técnicas de inteligencia artificial para la detección de anomalías en reactores nucleares (INAIA)

**Gumersindo Verdú, Empar Navarro, Mónica Chillarón, Antoni Vidal, Damián Ginestar, Mayte Capilla, César Talavera y Vicent Vidal.** UPV

La operación segura y eficiente de las centrales nucleares españolas exige el desarrollo constante de técnicas avanzadas que garanticen la disponibilidad y producción de energía bajo los más estrictos estándares de seguridad. Haciendo uso de instrumentación de medida en el núcleo de los reactores, es posible registrar la distribución y el comportamiento del flujo, permitiendo analizar la aparición de fluctuaciones, conocidas como ruido neutrónico. Estas anomalías, que comprometen la operación segura del reactor, ofrecen una información importante que puede emplearse para revertir la situación de inestabilidad.

En este contexto, el marco del proyecto INAIA (financiado por el CSN en su convocatoria de subvenciones de I+D) propone el uso del aprendizaje profundo para monitorizar el núcleo del reactor y detectar de forma temprana posibles fluctuaciones en el flujo de neutrones. La metodología seguida contempla el diseño y validación de redes neuronales convolucionales (CNN) que sean capaces de clasificar y localizar las perturbaciones en reactores 2D y 3D, con elevada precisión y con un coste computacional reducido. Para el entrenamiento de los modelos de CNN, es crucial contar con una base de datos amplia y de alta calidad. En este proyecto se han generado más de cincuenta mil archivos de datos mediante el código de elementos finitos FEMFFUSION, desarrollado en la Universitat Politècnica de València y que permite simular la propagación del ruido neutrónico ante diversas perturbaciones en el núcleo.

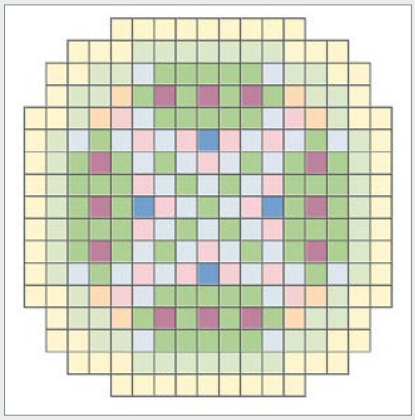


Figura 1. *Geometría del reactor BIBLIS 2D donde se describen los distintos materiales que lo componen, con las secciones eficaces homogenizadas y dadas para dos grupos de energía.*

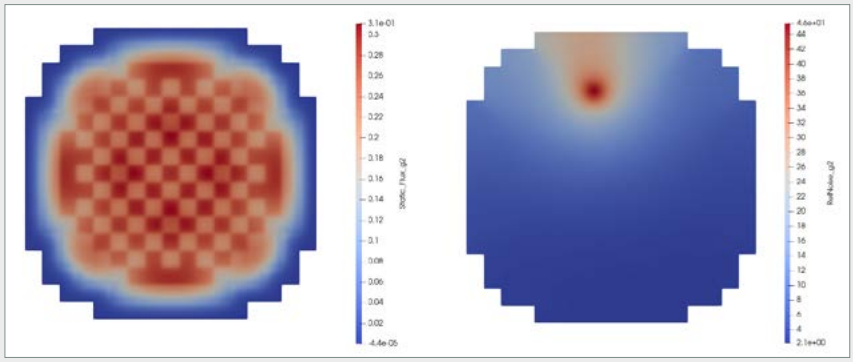


Figura 2. *A la izquierda, la distribución radial del flujo térmico estático para el reactor BIBLIS 2D obtenido en FEMFFUSION sobre el que se aplica el ruido neutrónico. A la derecha, la distribución radial del ruido neutrónico en el reactor BIBLIS 2D obtenido en FEMFFUSION y que se aplicará sobre la distribución del flujo estático en la localización marcada.*

## Desarrollo de la red neuronal convolucional para reactores 2D

La base de datos para detectar las anomalías sobre reactores 2D se genera en FEMFFUSION provocando oscilaciones en las secciones eficaces de absorción y dispersión sobre todos los elementos que componen la geometría 17x17 del *benchmark* BIBLIS-2D de la IAEA, obteniendo como resultado las distribuciones espaciales del ruido neutrónico relativo que alimentarán la red. Para alcanzar una CNN que detecte de forma eficiente las anomalías en reactores 2D y evitar el sobreajuste de la red neuronal, se proponen dos técnicas: introducir ruido blanco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian Noise*) y aplicar máscaras de valores activos distribuidos equidistantes a lo largo de la geometría del reactor. El uso del ruido blanco gaussiano contribuye a la generación de más datos de entrenamiento y a introducir el ruido propio de la instrumentación de medida. Mientras, el uso de máscaras de valores activos permite estudiar el mínimo número de datos que la red necesita conocer para ser eficiente.

Los resultados numéricos obtenidos tras las fases de entrenamiento y prueba son altamente satisfactorios, demostrando su capacidad para identificar el tipo de perturbación y su ubicación exacta, incluso bajo condiciones de ruido elevado. Uno de los hallazgos más relevantes es la relación entre el número de detectores y la precisión, arrojando precisiones superiores al 90 % respecto a la clasificación y localización de perturbaciones empleando un bajo número de valores activos. Esto revela que se puede prescindir de alimentar la red con todos los datos generados para cada distribución de flujo, siendo suficiente conocer

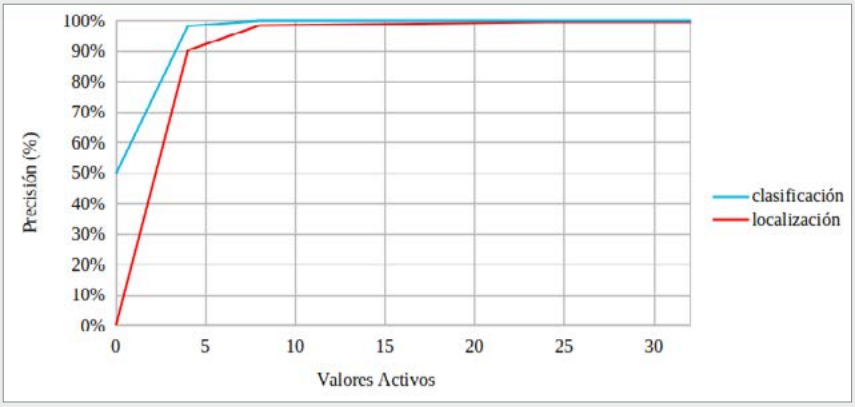



Figura 3. *Resultados para la precisión del entrenamiento para el reactor BIBLIS 2D en función del número de valores activos y del tipo de entrenamiento, clasificación y localización de la perturbación.*

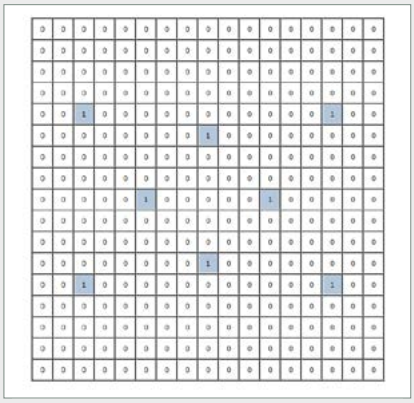


Figura 4. *Distribución de los ocho valores activos con los que la red entrena para cada distribución de flujo perturbado.*

unos pocos valores y sus posiciones por cada una de las distribuciones que se le pasan. Concretamente, emplear ocho valores activos optimiza la eficiencia de detección sin comprometer el tiempo de computación, alcanzando una precisión del 99,95 % para clasificar el tipo de perturbación y del 98,52 % para localizar dónde ocurre la anomalía.

## Desarrollo de la red neuronal convolucional para reactores 3D

La metodología empleada para desarrollar una CNN 3D sigue la filosofía de la metodología empleada en el desarrollo de la CNN 2D. La base de datos se genera aplicando oscilaciones sobre cada uno de los elementos que conforman el reactor 3D del *benchmark* 3D-IAEA y se añade una tercera perturbación debida al cambio en la velocidad axial del flujo de refrigerante. A diferencia del caso 2D, la perturbación en el reactor 3D puede ocurrir en cualquier elemento de los diecinueve planos axiales que conforman la geometría 17x17, resultando en un problema más complejo de resolver para la red. A pesar de generarse una base de datos de entrada más extensa, se aplican las técnicas de *data augmentation*, mediante ruido blanco gaussiano aditivo, y para evitar el sobreajuste se hace uso de las máscaras de valores activos. La aplicación del ruido blanco y las máscaras se extiende a cada una de las distribuciones de flujo perturbado que se generan con FEMFFUSION, dando lugar a una elevada cantidad de datos de entrenamiento.

Si bien detectar la perturbación en un reactor 3D es más complejo y requiere de un mayor tiempo computacional, las precisiones alcanzadas por la red son un reflejo de los obtenidos con la red 2D. Con tan solo cuatro valores activos distribuidos a lo largo del volumen del reactor, la precisión tanto en clasificación como en localización supera el 90 %. Con ocho valores activos, la CNN es capaz de detectar de forma óptima las perturbaciones, obteniendo una precisión del 99,11 % en la clasificación de la anomalía y del 98,26 % en su localización dentro del núcleo. A partir de este número de detectores, las mejoras en la precisión, tanto para reactores 2D como 3D, dejan de ser importantes y los tiempos de computación aumentan significativamente, lo que valida la viabilidad de implementar estas técnicas en entornos reales con una instrumentación limitada.

## Conclusiones y futuras aplicaciones

En términos generales, ambos modelos y sus variantes demuestran la capacidad de la inteligencia artificial, concretamente de las redes neuronales convolucionales, para la detección de anomalías en los reactores nucleares de agua a presión. Las elevadas precisiones que se obtienen son prometedoras y dan paso a continuar su aplicación. Los futuros trabajos que derivan de los resultados de este proyecto son ambiciosos pero basados en las necesidades actuales y futuras. No solo se busca ampliar el abanico de perturbaciones sobre el flujo, sino comenzar a trabajar con distintas geometrías de reactor y tipos de reactores nucleares, introduciendo los reactores modulares pequeños, que comenzarán a tener un papel significativo en el panorama energético mundial. El paso más importante para cerrar el ciclo de este proyecto será comparar las precisiones obtenidas para los entrenamientos con datos simulados respecto a datos procedentes de la monitorización real de los reactores. ■

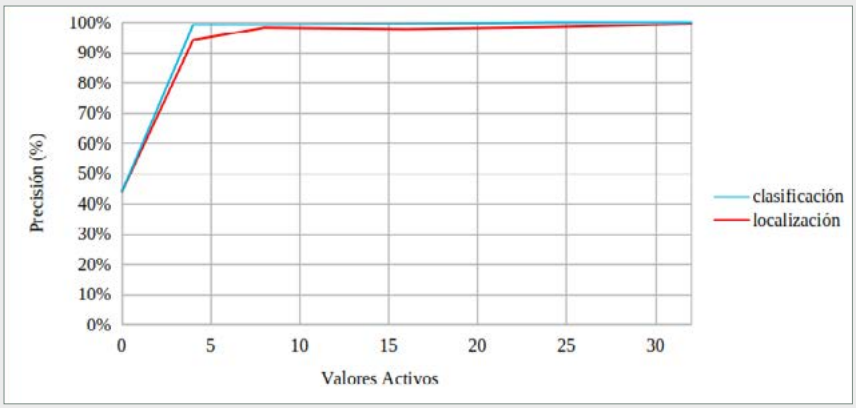



Figura 6. *Resultados para la precisión del entrenamiento para el reactor 3D-IAEA en función del número de valores activos y del tipo de entrenamiento, clasificación y localización de la perturbación.*

# IBM Quantum System Two

## Arquitectura modular y ambición científica en el ecosistema BasQ




Texto: **Pablo Santamarta** | Fotos: **Creditos BasQ - IBM**

El Gobierno Vasco e IBM inauguraron en octubre de 2025 el primer IBM Quantum System Two operativo en Europa, instalado en el Centro de Computación Cuántica IBM-Euskadi, en San Sebastián. La instalación de este sistema marca un hito en la colaboración estratégica entre ambas entidades, surgida en el marco de la iniciativa BasQ – Basque Quantum, que consolida al País Vasco como polo internacional en tecnologías cuánticas.

Solo existen tres IBM Quantum System Two operativos en el mundo. Uno se halla en los laboratorios centrales de IBM en Nueva York, otro en Kobe (Japón) y el tercero en San Sebastián. No se trata de una réplica experimental: es el sistema cuántico comercial más potente actualmente disponible, con 156 cúbits de circuitos superconductores y una arquitectura modular concebida para escalar mediante la interconexión de múltiples chips.

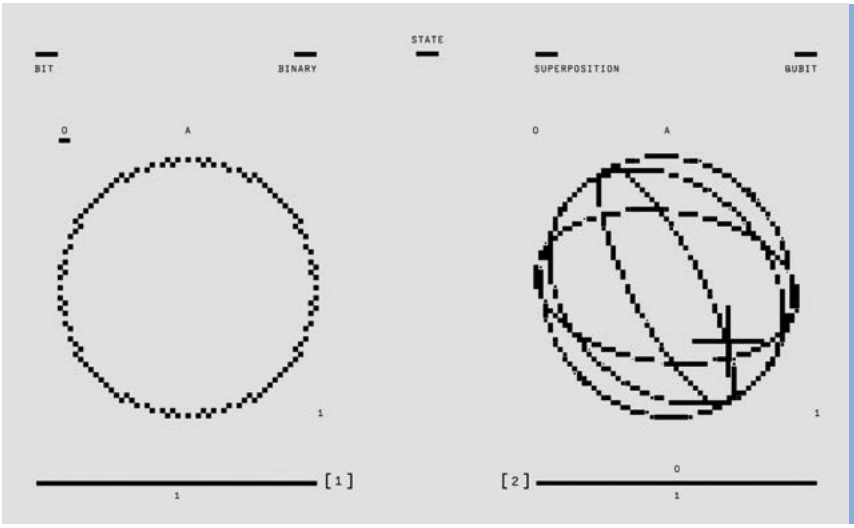


*El IBM Quantum System Two se diferencia de generaciones anteriores por dos elementos centrales: el número de cúbits disponibles –156– y el nivel de fidelidad alcanzado en las operaciones cuánticas*

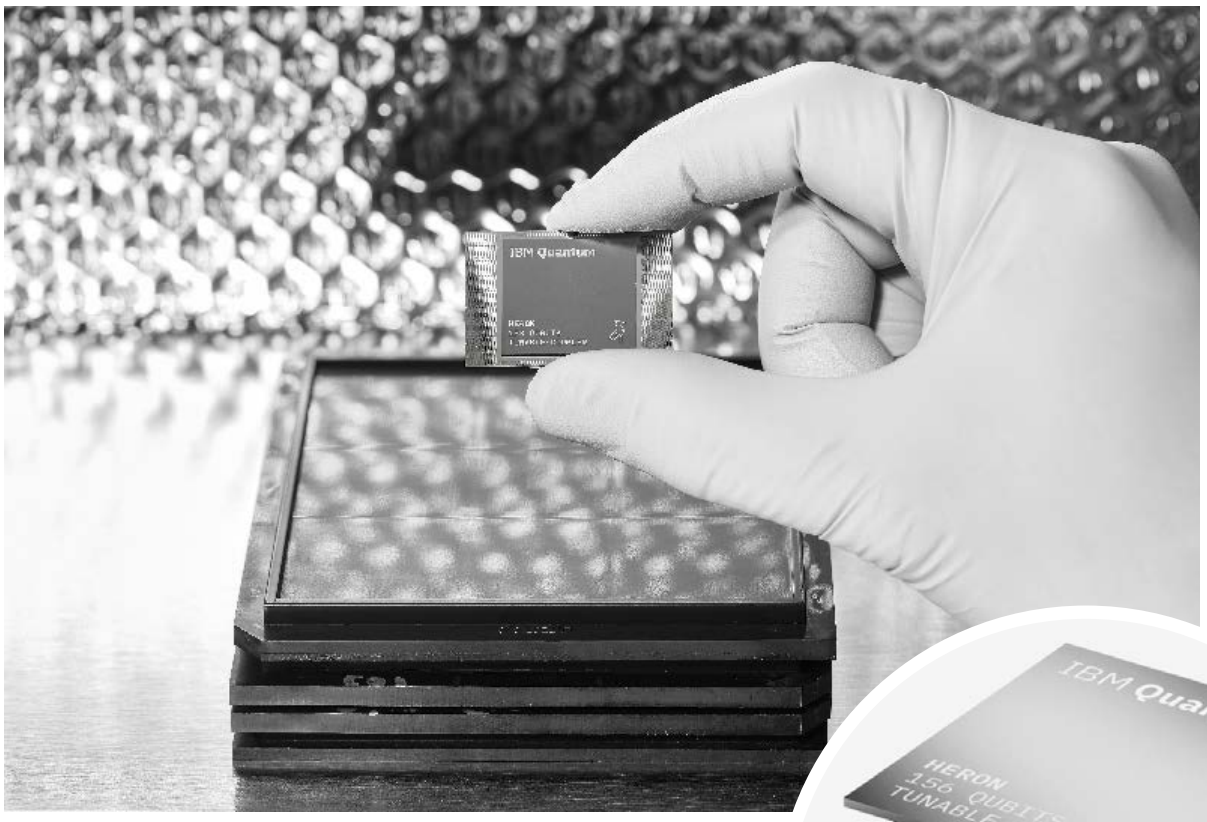
**El sistema**

El IBM Quantum System Two se diferencia de generaciones anteriores por dos elementos centrales: el número de cúbits disponibles –156– y el nivel de fidelidad alcanzado en las operaciones cuánticas. No se trata únicamente de cantidad, sino de calidad en la conexión entre cúbits, lo que permite obtener resultados más fiables y aplicar técnicas de corrección de errores con mayor éxito. La topología de los 156 cúbits sigue una distribución de red pesada hexagonal, que determina cómo se establecen las conexiones necesarias para superposición y entrelazamiento en los algoritmos. En función del problema a resolver, pueden requerirse topologías de conexión intercúbit distintas a la red pesada hexagonal, lo que implica ejecutar los circuitos en remoto en otros nodos de la red IBM con arquitecturas más apropiadas.

En el IBM Quantum System Two, los cúbits son superconductores: pequeños circuitos eléctricos que, al enfriarse a temperaturas cercanas al cero absoluto, se comportan como sistemas cuánticos controlables mediante pulsos de microondas. Su principal desafío es la sensibilidad al ruido, lo que obliga a repetir los cálculos y aplicar técnicas de corrección o mitigación de errores.




Un cúbit es la unidad básica de información de un ordenador cuántico. A diferencia del bit clásico –que solo puede valer 0 o 1–, puede estar en una superposición de ambos estados al mismo tiempo. Además, pueden entrelazarse entre sí, generando correlaciones que no existen en la computación tradicional y que permiten abordar ciertos cálculos de manera diferente.







La red pesada hexagonal es el patrón de conexiones físicas entre los cúbits de un procesador cuántico. Define qué cúbits pueden interactuar directamente entre sí para realizar operaciones de entrelazamiento. En esta topología, los cúbits se organizan en una estructura similar a un entramado hexagonal, pero con conexiones reforzadas –«pesadas»– en determinados enlaces. Esto reduce interferencias, mejora la fidelidad de las operaciones y equilibra el número de conexiones por cúbit.

**Modularidad, control y límites técnicos**

La arquitectura modular ofrece ventajas criogénicas y organizativas. La operación de cúbits de circuitos superconductores exige condiciones extremas de refrigeración, y la división en módulos permite una gestión más efectiva de ese entorno físico. A su vez, el *hardware* ha evolucionado con rapidez. Según Javier Aizpurua, director científico de BasQ, «muchos de los investigadores que han calculado con infraestructuras anteriores a esta han podido verificar la tremenda diferencia de calidad entre los resultados actuales y los de hace tan solo un año».

Hoy es posible entrelazar y superponer más de 150 cúbits con estabilidad y control. Sin embargo, el límite principal no es solo el número de cúbits conectados, sino la llamada profundidad de circuito. Actualmente, pueden ejecutarse en torno a cinco mil capas de operaciones de dos cúbits antes de que el ruido degrade el resultado. Superado ese umbral, el cálculo pierde fiabilidad. El objetivo es alcanzar sistemas tolerantes a fallos que permitan superar esa barrera.

**La estrategia BasQ**

El centro no nació únicamente para albergar una máquina avanzada. Desde su puesta en marcha como proyecto estratégico en 2023, el objetivo fue preparar al ecosistema científico y tecnológico vasco para desarrollar algoritmia cuántica propia y explorar aplicaciones reales. La premisa era clara: una infraestructura con este potencial solo adquiere sentido si existe una comunidad robusta capaz de explotarla. Dos años después del arranque del centro y tras la entrada en funcionamiento del System Two, cerca de veinte grupos de investigación ejecutan ya circuitos cuánticos con desarrollos algorítmicos propios, y más de cuatrocientos investigadores y profesionales han sido formados en diseño y ejecución de circuitos cuánticos. «IBM está positivamente sorprendida por la celeridad de adopción de la máquina por parte del ecosistema BasQ», destaca el director.




*Una infraestructura con este potencial solo adquiere sentido si existe una comunidad robusta capaz de explotarla*

En ciertos materiales, los espines –propiedades cuánticas asociadas al magnetismo de las partículas– pueden organizarse no solo en el espacio, sino también en el tiempo. Un «cristal temporal» es un estado en el que el sistema presenta una estructura periódica que se repite a intervalos regulares temporales cuando es sometido a una perturbación externa. En redes magnéticas bidimensionales, este comportamiento puede generar propiedades de imanación inusuales. Caracterizar estos estados permite comprender mejor cómo controlar la materia a escala cuántica mediante estímulos externos.

En física de materiales se ha logrado caracterizar comportamientos temporales inusuales en cadenas bidimensionales de espines que dan lugar a propiedades magnéticas novedosas, asociadas a «cristales temporales» en redes magnéticas. En física de altas energías, el sistema ha permitido describir la evolución en tiempo real de interacciones de partículas subatómicas, cálculos de gran exigencia computacional. En inteligencia artificial aplicada al ámbito biosanitario, grupos del ecosistema han desarrollado algoritmos híbridos que mejoran el diagnóstico de la malignidad de mutaciones genéticas. También se están obteniendo resultados competitivos en la resolución de ecuaciones en derivadas parciales relacionadas con la dinámica turbulenta de fluidos. Según la dirección científica del proyecto, estos avances no habrían sido posibles sin acceso a esta infraestructura singular.

### Hibridación cuántico-clásica

La computación cuántica no se presenta como sustitución de la clásica. Cuando un problema no puede resolverse exclusivamente con los cúbits disponibles, se divide: el núcleo del cálculo se ejecuta en el ordenador cuántico y otras partes en clústeres clásicos.

En San Sebastián, esta hibridación se apoya en los clústeres del Centro de Cálculo de Euskadi en el Donostia International Physics Center (DIPC). Existen proyectos concretos de estructura electrónica de moléculas y sólidos en los que estos flujos híbridos mejoran eficacia





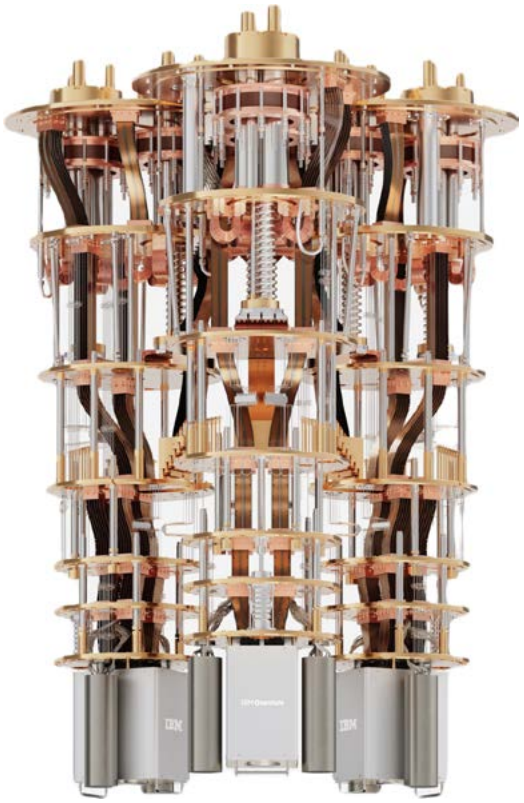

## Javier Aizpurua

Director científico de Basque Quantum (BasQ) y profesor de investigación Ikerbasque en el Donostia International Physics Center (DIPC). Especialista en física de materiales y nanoóptica, ha desarrollado su carrera en el ámbito de la interacción luz-materia y la física cuántica aplicada. Desde la dirección científica de BasQ coordina la estrategia vinculada al IBM-Euskadi Quantum Computational Center y la integración del IBM Quantum System Two en el ecosistema científico y tecnológico. vasco.

*El sistema pone al ecosistema cuántico vasco como referente mundial, al ser uno de los poquísimos lugares en el mundo que goza de semejante capacidad de computación*







y exactitud. Además, se exploran técnicas sofisticadas de corrección y recuperación de errores, ya que cada problema debe ejecutarse miles de veces para obtener resultados estadísticamente fiables.

**Ecosistema y dimensión estratégica**

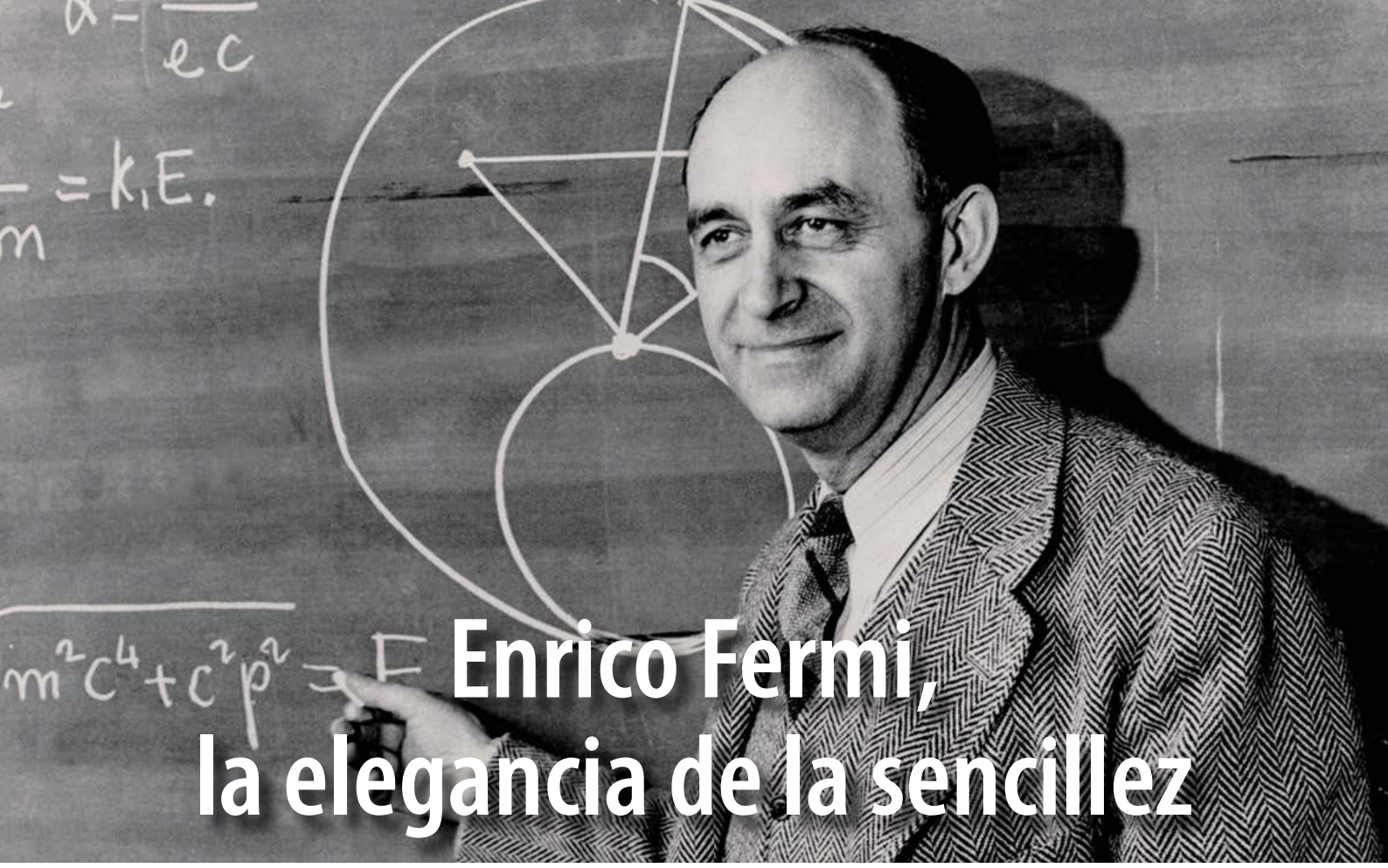
Más allá de los resultados científicos inmediatos, el IBM Quantum System Two actúa como elemento estructurador de un ecosistema que combina investigación básica, desarrollo algorítmico y tejido empresarial. La estrategia no se limita a utilizar la máquina, sino a generar capacidades propias en torno a ella.

En el ámbito empresarial, el ecosistema cuántico vasco integra compañías que trabajan en algoritmia cuántica o en soluciones inspiradas en cuántica, como Multiverse, Global Data Quantum o i3B (la unidad de I+D de Ayesa). Estas empresas no operan únicamente como usuarias finales, sino como desarrolladoras de herramientas y soluciones que pueden trasladarse a sectores como energía, finanzas, industria o farmacia. La lógica es que la innovación no se concentre exclusivamente en el laboratorio, sino que encuentre una vía de transferencia hacia aplicaciones con impacto económico.

En paralelo, la estrategia contempla que el ordenador no sea un punto final, sino un motor de innovación continua. Además de ejecutar cálculos en el System Two, en el ecosistema vasco se investigan alternativas de *hardware* cuántico a un nivel más fundamental, desde redes de átomos ultrafríos hasta espines en puntos cuánticos semiconductores o implementaciones basadas en estados topológicos. No existe aún consenso sobre cuál será la tecnología dominante en el futuro: la apuesta estratégica pasa por no cerrarse a una única vía.

Desde el punto de vista institucional, la presencia del System Two sitúa a San Sebastián en una red global extremadamente reducida de centros con esta infraestructura. La relevancia, no obstante, no reside únicamente en disponer del equipo, sino en lo que se haga con él. Aizpurua subraya el valor añadido de la dinámica de excelencia que pueda generar: atraer talento, consolidar líneas de investigación y reforzar la posición del ecosistema vasco dentro de Europa. «El sistema pone al ecosistema cuántico vasco como referente mundial, al ser uno de los poquísimos lugares en el mundo que goza de semejante capacidad de computación», afirma.

La dimensión estratégica también incluye una reflexión más amplia. «La computación cuántica es una tecnología disruptiva que puede cambiar la capacidad tecnológica y la competitividad de una sociedad, de tal manera que aquellos que no dispongan de estas herramientas, o no dispongan de alguna capacidad en este sector, podrían desaparecer de la carrera tecnológica». Desde esta perspectiva, no participar activamente en su evolución implicaría asumir un riesgo estructural en la carrera tecnológica global. Al mismo tiempo, se reconocen desafíos asociados a su desarrollo, desde la posible ampliación de brechas tecnológicas hasta cuestiones de supervisión y transparencia algorítmica. En ese equilibrio entre ambición tecnológica y cautela estructural se sitúa la apuesta vasca: convertir una infraestructura singular en un instrumento de posicionamiento científico e industrial a medio y largo plazo. ■



# Enrico Fermi, la elegancia de la sencillez

«El navegante italiano acaba de aterrizar en el nuevo mundo». Con este mensaje en clave, se anunció al Gobierno estadounidense el éxito de lo ocurrido el 2 de diciembre de 1942 en el subsuelo de una antigua cancha de *squash* de la Universidad de Chicago. Se acaba de producir la primera reacción nuclear en cadena controlada y autosostenida, un suceso fundamental para el desarrollo del Proyecto Manhattan y la aparición de la bomba atómica. Enrico Fermi ganó el Nobel de Física en 1938, tras demostrar cómo la transformación nuclear ocurre en casi todos los elementos sometidos al bombardeo neutrónico.

Texto: **Miguel Sánchez**

Tercer hijo de la maestra de escuela Ida de Gattis, y del inspector de telecomunicaciones Alberto Fermi, Enrico nació en Roma el 29 de septiembre de 1901. Aficionado a los motores eléctricos y los juguetes mecánicos, se inclinó en su adolescencia hacia la física al leer un tratado matemático publicado en el siglo XIX: el *Elementorum physicae mathematicae*.

Fermi demostró dotes de memoria, cálculo y construcción de mecanismos desde muy pequeño. Concluyó el bachillerato en 1918 e ingresó en la Scuola Normale Superiore de Pisa, destacando en su examen de acceso por el uso de ecuaciones en derivadas parciales para el estudio de fenómenos relacionados con el sonido.

## Años de formación

Bajo la dirección del profesor Luigi Puccianti, el joven Fermi evolucionó con rapidez en sus estudios de física. Su conocimiento y habilidad investigadora era de tal calibre que sus propios maestros consideraban difícil estar por delante de él, encomendándole la organización de seminarios sobre física cuántica.

El interés por las teorías de Einstein avivó sus primeros trabajos científicos. Publicados en 1921 en la revista *Nuovo Cimento*, «Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio» y «Sull'elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle

masse elettromagnetiche» abordaron las contradicciones de la ley de Coulomb frente a la teoría general de la relatividad.

Durante el mismo año, ejerció *en Sopra i fenomeni che avvengono in vicinanza di una linea oraria* un ejercicio de cálculo diferencial absoluto tras estudiar las relaciones entre los campos gravitacional y electromagnético. En paralelo, logró su diploma en la Scuola Normale Superiore con una tesis sobre la difracción en imágenes por rayos X, graduándose con honores en Física, poco antes de que Mussolini tomara el poder tras la Marcha sobre Roma.

### Hacia una nueva física

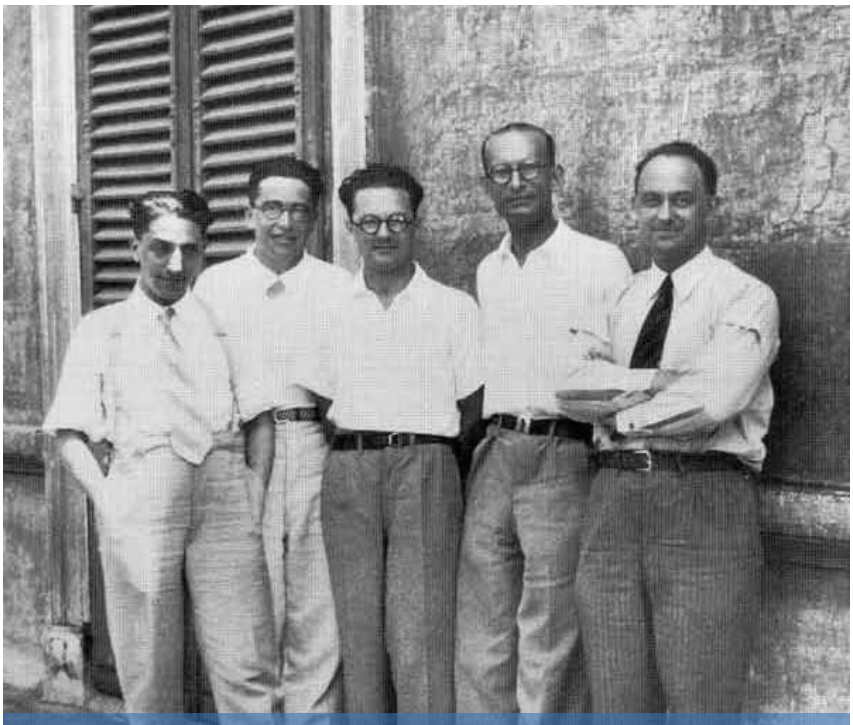
En la Italia de aquellos años, la física teórica no había penetrado en las universidades. En palabras de Franco Rasetti (compañero de Fermi en Pisa y futuro opositor al desarrollo de la bomba atómica), «los físicos eran esencialmente físicos experimentales».

No obstante, el director del Instituto de Física de Roma, Orso Mario Corbino, apadrinó a los nuevos alumnos ganando el apelativo informal de «Dios Padre». Convencido de la necesidad de avanzar en física teórica, Corbino promovió a Fermi en la obtención de una beca para formarse en Alemania con Max Born.

Tras aquella primera experiencia internacional, Fermi acudió en 1924 a los Países Bajos para estudiar en Leiden con el físico austriaco Paul Ehrenfest. Allí desarrolló sus conocimientos de mecánica cuántica e incluso conoció a Albert Einstein, introduciéndose al fin en la vanguardia científica, justo antes de incorporarse a su plaza de profesor en Florencia a finales de año.

Fermi estudió el principio de exclusión, publicado por Wolfgang Pauli en 1925. Basado en que «dos electrones en la corteza de un átomo no pueden tener al mismo tiempo los mismos números cuánticos», estableció cómo dos partículas sometidas a este principio de exclusión no existen en el mismo tiempo y lugar en caso de compartir un mismo estado.

En 1926, y tras haber publicado hasta cinco artículos sobre la mecánica estadística aplicada a los sistemas cuánticos, Fermi publicó *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*. Formuló la teoría de un gas ideal con partículas que obedecen al principio de exclusión de Pauli, denominadas fermiones en su honor, y logró con este artículo reconocimiento internacional y una cátedra de Física Teórica en Roma.



*Fermi y sus estudiantes (los chicos de Panisperna) en el patio del Instituto de Física en la Vía Panisperna de la Universidad de Roma. De izquierda a derecha: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti y Fermi.*

### Los últimos años en Italia

Preocupado por lograr vocaciones científicas, Fermi atrajo la atención de los jóvenes publicando obras divulgativas como *Introduzione alla fisica atomica*. Entre sus alumnos, perduró el recuerdo de un profesor apasionado e imaginativo, con nuevas perspectivas a la hora de resolver los problemas de la física teórica.

En 1933, al tiempo que aumentaba el interés por las cuestiones nucleares, Fermi desechó los electrones entre las partículas constituyentes del núcleo de un átomo tras plantear la inestabilidad del neutrón, definido por James Chadwick en 1932.

Con la teoría de la desintegración beta, abrió el campo de la física de las interacciones débiles, siendo su *Tentativo di una teoria dei raggi β* uno de los artículos más importantes en toda su carrera.

Unos meses más tarde, en 1934, Fermi alcanzó otro hito en su carrera *con Radioattività indotta da bombardamento dei neutroni.* Ejemplo de su evolución desde la física teórica hacia la experimental, trabajó con la irradiación de neutrones para inducir radiactividad, descubriendo así nuevos elementos radiactivos. Una de las razones para ganar el Nobel de Física en 1938.

### 1938, del Nobel al exilio

Aunque se había mantenido al margen de la política, la intrusión del Gobierno fascista en la ciencia aumentaba sin cesar. Por otra parte, las leyes raciales aprobadas en septiembre de 1938 ponían en peligro a su esposa con ascendentes judíos. Italia ya no era un lugar seguro. En contraste, las universidades estadounidenses aparecían estables y prometedoras para Fermi. Escribió a varias de ellas, logrando diversas oportunidades de trabajo que le llevan a la Universidad de Columbia en Nueva York.

Recoger en Estocolmo el Nobel de Física en diciembre de 1938



*Laura Fermi y Enrico Fermi.*



*Punto crítico de fisión en Pile-1, 1942.*



*Grupo Pile-1, 1942.*

tuvo un doble significado. Era el reconocimiento ceremonioso a su labor científica, pero también el abandono de su país natal, pues, aunque solicitó los pasaportes alegando una estancia docente de seis meses, la intención de la familia era emprender el exilio definitivo. Desde Suecia partió a Nueva York. Mientras, en Italia, la censura de Mussolini citaba sin importancia la gala de entrega, al tiempo que criticaba al físico por no haber realizado el saludo fascista ante las cámaras.

### Una ciencia en secreto

Instalado en un ambiente con medios superiores a los italianos, Fermi trabajó desde enero de 1939 con una gran variedad de científicos; muchos, exiliados europeos que, como él, escaparon de un ambiente académico controlado por gobiernos belicistas.

Sus investigaciones se centraron en el reciente descubrimiento de la fisión del uranio, con la hipótesis de núcleos de átomos emitiendo neutrones responsables de generar nuevas fisiones, capaces a su vez de crear una violenta reacción en cadena.

Lo plasmó en *The fission of uranium*, primero de sus artículos en los Estados Unidos, donde comunicaba el resultado de sus experimentos mediante «bombardeo neutrónico» en la fisión de núcleos de uranio.

A partir de aquí, Fermi decidió, junto a otros científicos asentados en Estados Unidos, no publicar sus trabajos. Temían beneficiar a Hitler y, de hecho, al poco tiempo la administración los clasificó de «alto secreto».

Fue en Alemania donde Otto Hahn y Fritz Strassman habían descubierto meses antes la fisión del uranio y, aun sin haber estallado la Segunda Guerra Mundial, nadie ignoraba sus implicaciones armamentísticas. Comenzaba la carrera hacia la bomba atómica con Fermi como figura clave en el Proyecto Manhattan.





*Fermi fotografiado en el control del sincrociclotrón de Chicago en 1942.*



**Proyecto Manhattan**

En el décimo aniversario de la Chicago Pile-1 (CP-1), Fermi señaló que «la secuencia de descubrimientos que condujo a la reacción nuclear en cadena formó parte de la búsqueda de la ciencia por una explicación más completa de la naturaleza y el mundo que nos rodea. Nadie tuvo la idea ni la intención inicial de contribuir a un mayor desarrollo industrial o militar».

La política condicionó a la curiosidad científica. James Chadwick sentenciaba: «en aquella época me di cuenta de que la bomba atómica no solo era posible, también inevitable. Entonces empecé a tomar somníferos. Era el único remedio». Consciente de la situación, Fermi informó al Gobierno estadounidense sobre el potencial militar de una reacción en cadena.

En 1940, Fermi y Herbert L. Anderson ya habían registrado avances con los experimentos de fisión a una escala mayor, en parte gracias a una partida cercana a los 200 kg de óxido de uranio lograda por Leó Szilárd, con quien Fermi trabajó en concebir los diseños del primer reactor nuclear. Respecto a cómo moderar la reacción en cadena, los trabajos de Fermi con neutrones apuntaban a que podría lograrse utilizando grafito. Un material básico en la construcción de la futura Chicago Pile-1 (CP-1), en la cual se utilizaron aproximadamente 349 000 kg (≈770 000 lb).

Un año después, EE. UU. entró en la Segunda Guerra Mundial tras el ataque japonés a Pearl Harbor. Los esfuerzos bélicos relativos a un dispositivo nuclear se aceleraron al año siguiente con el inicio del Proyecto Manhattan. Llegó la necesidad de materializar los ensayos de Fermi en un reactor operativo.

## Vía simple ante problema complejo

El 16 de julio de 1945, Enrico Fermi asistió a la prueba Trinity, primera explosión de un arma nuclear y ensayo de las bombas arrojadas sobre Hiroshima y Nagasaki. Interesado en conocer la fuerza de la detonación, dejó caer unos pedazos de papel antes, durante y después de la onda expansiva.

Tras unos breves cálculos, logró un resultado muy cercano al finalmente consensuado. Un proceder sencillo, tal y como trabajaba en la resolución de problemas con sus estudiantes, quienes en repetidas ocasiones valoraron su capacidad docente al plantear las lecciones en el aula.

Sus cálculos rápidos, algunos en soportes tan improvisados como una servilleta, fueron una constante en su carrera, utilizando razonamientos lógicos, órdenes de magnitud y supuestos razonables. Primero descomponía un problema complejo en varios más sencillos y cuantificables, luego manejaba potencias en vez de cifras exactas para simplificar el cálculo y, por último, realizaba una interpretación crítica del resultado.

Un ejemplo es su cálculo del número de afinadores de piano en Chicago, donde lo esencial para Fermi no era el resultado final, sino la propia consistencia del razonamiento. Su método se aplica a la física nuclear y la ingeniería, donde estimar es común en los preliminares del problema, especialmente cuando no existen mediciones disponibles o es necesario verificar la coherencia de modelos numéricos.

Con su método de estima, Fermi subrayó la capacidad de deducir información útil a partir de muy pocos datos, combinando la intuición física y el pensamiento cuantitativo. ■

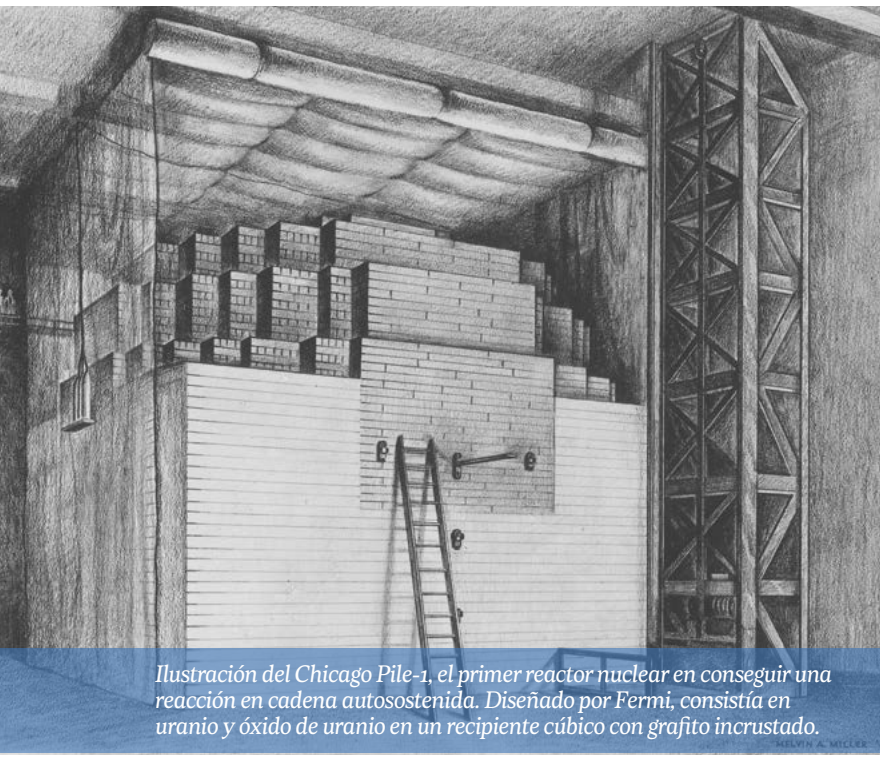


*Ilustración del Chicago Pile-1, el primer reactor nuclear en conseguir una reacción en cadena autosostenida. Diseñado por Fermi, consistía en uranio y óxido de uranio en un recipiente cúbico con grafito incrustado.*



*Maqueta Pile-1.*



*Pile-1 Ladrillos de grafito.*

**Chicago Pile-1 (CP-1), primer reactor artificial**

Instalada bajo la superficie del Stagg Field de la Universidad de Chicago, la pila nuclear del Chicago Pile-1 (CP-1) fue un hito en el desarrollo de la tecnología nuclear. Con una carga de uranio lo suficientemente potente en su interior, se envolvió en 57 capas de ladrillos de grafito donde había barras de cadmio destinadas a absorber neutrones y paralizar la reacción.

El 2 de diciembre de 1942 se extrajeron poco a poco, de forma manual, provocando la multiplicación de neutrones. En palabras de Fermi, «no fue espectacular, no explotaron petardos ni se encendieron luces. Pero para nosotros significaba que una liberación nuclear a gran escala era solo cuestión de tiempo». La reacción autosostenida por iniciativa humana ya era una realidad. Tras esto, Fermi trabajó en el equipo del reactor de grafito X-10. Otro hito en la evolución de los reactores, y, al fin, en la producción de plutonio en los mismos.

La esperanza de Fermi estaba en que «para el final de la guerra, la energía atómica se desviara definitivamente de las armas a los usos pacíficos. Esperábamos que la construcción de centrales nucleares y la producción de elementos radiactivos para la ciencia y la medicina se convirtieran en los objetivos principales». No obstante, hasta el lanzamiento de las bombas de Hiroshima y Nagasaki en 1945 todo el esfuerzo se concentró en el laboratorio del Proyecto Manhattan en Los Álamos.

Acabada la Segunda Guerra Mundial, Fermi obtuvo un puesto como profesor de física en la Universidad de Chicago, donde siguió trabajando en cuestiones nucleares, aunque también orientó sus investigaciones a los rayos cósmicos y el renovado interés por el espacio exterior. Su muerte prematura, a los 53 años, víctima de un cáncer de estómago, supuso la pérdida de un investigador clave en la física del siglo XX ■

## ¿Hay vida ahí afuera?

La Paradoja de Fermi, expresada de manera informal poco antes de su muerte, especula sobre la vida extraterrestre y el contacto con la misma. Hay millones de estrellas solo en nuestra galaxia. Por probabilidad, resulta factible pensar que en torno a alguna de ellas orbita algún planeta con vida inteligente. Sin embargo, no hay constancia alguna de su existencia. Tras participar en el Proyecto Manhattan, Fermi comprobó cómo una especie avanzada obtenía la capacidad técnica para autodestruirse, y pensó en la posibilidad de encontrar vida extraterrestre vagando por el espacio. ■

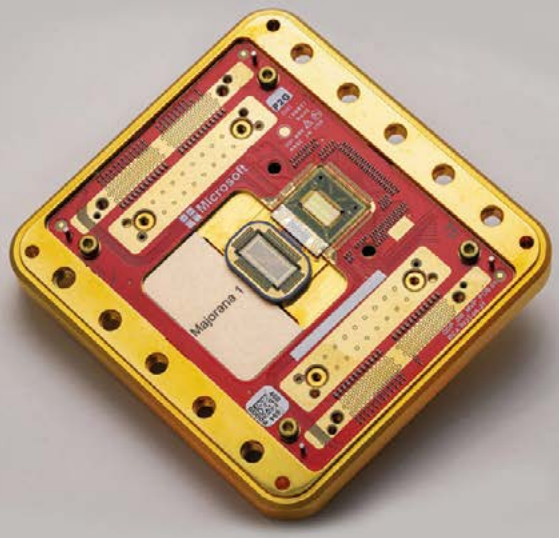
**Bibliografía recomendada:**


Segrè, Gino (2017). *The Pope of Physics: Enrico Fermi and the birth of the Atomic Age*. London: Picador Paper.

Fermi, Laura (2014) [1954]. *Atoms in the family. My life with Enrico Fermi*. Chicago: Chicago University Press.

Rhodes, Richard (2012) [1986]. *The making of the atomic bomb: 25th Anniversary Edition*. Nueva York: Simon & Schuster.

Schweber, Silvan S. (2013) [2000]. *In the shadow of the bomb: Oppenheimer, Bethe, and the moral responsibility of the scientist*. Princeton: Princeton University Press.




# Científicos logran leer por primera vez cúbits de Majorana, un hito para la computación cuántica robusta

Un equipo internacional con participación del CSIC ha demostrado experimentalmente la lectura en disparo único (*single-shot readout*) del estado de paridad en cúbits topológicos basados en modos cero de Majorana. El trabajo, publicado en *Nature*, constituye una validación clave para arquitecturas cuánticas topológicamente protegidas. Estos cúbits codifican la información de forma no local, distribuyéndola entre modos espacialmente separados, lo que les confiere protección frente a perturbaciones locales y procesos de decoherencia.

El reto consistía en acceder a dicha información sin comprometer esa protección. Para ello, los investigadores emplearon una técnica de capacitancia cuántica sensible a la paridad fermiónica, capaz de discriminarla en una única medición y en tiempo real. El dispositivo se implementó en una cadena mínima de Kitaev, donde se observaron saltos de paridad y tiempos de coherencia superiores al milisegundo. El resultado supone un avance significativo hacia la integración de cúbits topológicos en plataformas de computación cuántica tolerantes a fallos..

## Artemis II: la NASA prepara el regreso tripulado a la órbita lunar

La NASA avanza en Artemis II, el primer vuelo tripulado alrededor de la Luna desde el programa Apolo en 1972. La misión, prevista no antes de 2026, llevará a cuatro astronautas: Reid Wiseman, Victor Glover y Christina Koch (NASA) y Jeremy Hansen (Agencia Espacial Canadiense). La tripulación ejecutará una trayectoria de retorno libre, sin alunizaje, en una misión de aproximadamente diez días. El lanzamiento se realizará mediante el cohete Space Launch



System y la nave Orion, concebida para operaciones más allá de la órbita terrestre baja.

El objetivo es validar en condiciones reales los sistemas de soporte vital, navegación autónoma, comunicaciones en espacio profundo y reentrada atmosférica tras una misión translunar. Además, se recopilarán datos sobre exposición a radiación cósmica y fisiología humana en espacio profundo, variables críticas para futuras misiones a Marte. Artemis II constituye el paso previo a Artemis III, que prevé un alunizaje en el polo sur lunar y la consolidación de una arquitectura internacional de exploración sostenida.

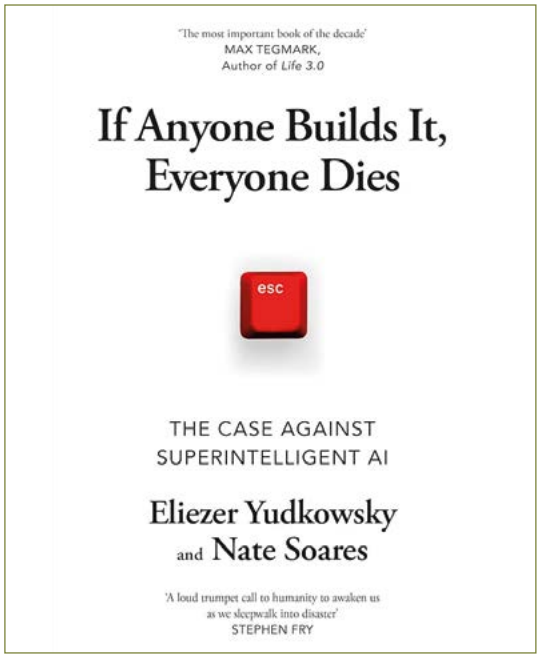
# EFEMÉRIDES

## 150 años de la revolución estadística de Boltzmann

En 1876, Ludwig Boltzmann dio un paso decisivo al fundamentar la segunda ley de la termodinámica en términos estadísticos, interpretando la entropía como medida del número de configuraciones microscópicas compatibles con un estado macroscópico. Con ello, la irreversibilidad dejó de ser un principio meramente fenomenológico para entenderse como consecuencia probabilística del comportamiento colectivo de sistemas con un número muy elevado de grados de libertad. Este enfoque inauguró la mecánica estadística moderna y proporcionó el marco conceptual del que derivan la teoría cinética y, posteriormente, la ecuación de transporte que lleva su nombre. En el ámbito nuclear, estos fundamentos resultan esenciales para la descripción del transporte de neutrones, la física de reactores y el análisis de sistemas termohidráulicos fuera del equilibrio. Ciento cincuenta años después, la formulación boltzmanniana continúa sustentando la modelización cuantitativa de sistemas complejos y la evaluación rigurosa de la incertidumbre en seguridad nuclear. ■



# LIBROS




Yudkowsky, E. y Soares N. (2025)

*If Anyone Builds It, Everyone Dies: The Case Against Superintelligent AI*

Editorial THE BODLEY HEAD LTD, 304 pp.

## *If Anyone Builds It, Everyone Dies*

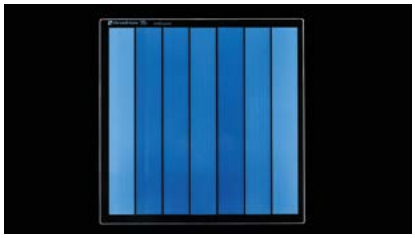
La carrera global por desarrollar una inteligencia artificial superior a la humana ha dejado de ser un desafío meramente tecnológico para convertirse en una cuestión de alcance existencial. Esta obra, considerada una de las más influyentes en el debate contemporáneo sobre la IA por la comunidad científica internacional, sostiene una tesis deliberadamente incómoda: la creación de una superinteligencia podría entrañar riesgos de magnitud civilizatoria. Con una argumentación directa y técnicamente fundamentada, los autores examinan los límites del alineamiento, la fragilidad del control humano y la insuficiencia de los marcos regulatorios actuales. Asimismo, plantean escenarios plausibles y sitúan la innovación disruptiva en el marco de la seguridad global y la estabilidad estratégica.

El volumen se inscribe en la tradición del llamado *AI risk* o riesgo existencial asociado a sistemas avanzados, pero lo hace con un enfoque marcadamente preventivo, que prioriza la contención tecnológica frente al impulso competitivo entre potencias y corporaciones. Yudkowsky y Soares cuestionan la viabilidad de un desarrollo incremental seguro y advierten sobre los incentivos geopolíticos que podrían acelerar decisiones imprudentes. Más allá de la controversia que suscita su postura, la obra contribuye a desplazar el debate desde el entusiasmo acrítico hacia una discusión estructurada sobre gobernanza, responsabilidad y límites del progreso técnico. ■

# EN RED

## Vidrio como archivo del futuro para la preservación de datos a escala milenaria

Un equipo de Microsoft Research ha demostrado la viabilidad de almacenar datos a escala milenaria utilizando vidrio como soporte físico, mediante técnicas de escritura con láser de femtosegundo. En el artículo publicado en la revista *Nature*, se describe la capacidad de registrar información equivalente a millones de páginas en un pequeño elemento vítreo, gracias a la generación de nanoestructuras ópticas tridimensionales estables durante miles de años.



La tecnología se basa en microexplosiones de plasma inducidas por pulsos ultrarrápidos que graban datos en el interior del material, aumentando significativamente la densidad de almacenamiento y su estabilidad térmica y química. Frente a soportes convencionales como discos duros o cintas magnéticas, con una vida útil limitada a décadas, este enfoque propone un medio inerte capaz de preservar información crítica sin degradación apreciable. Aunque no está orientado al uso cotidiano, el sistema podría aplicarse a archivos patrimoniales, científicos e institucionales. Los investigadores señalan que la mejora de los algoritmos de lectura óptica y de la escritura paralela será clave para su futura implementación. ■

*Más información: https://www.nature.com/articles/d41586-026-00502-2*

## El hielo como archivo genético: identificada una bacteria milenaria con resistencia a antibióticos actuales

Investigadores de la Academia Rumana y la Universidad de Bucarest, en colaboración con la Universidad de Antofagasta en Chile, han descrito el primer genoma completo de una bacteria aislada de hielo cavernario de cinco mil años en la cueva de Scărișoara (Rumanía). La cepa, *Psychrobacter* SC65A.3 (afín a *P. cryohalolentis*), es psicrófila y halotolerante, rasgos coherentes con un entorno subterráneo frío y salino. Su secuenciación revela un cromosoma circular de aproximadamente 3,05 Mb, que permite reconstruir un «resistoma» ancestral mediante herramientas genómicas actuales. En ensayos *in vitro*, el aislado mostró resistencia a diez de los veintiocho antibióticos evaluados, pese a proceder de un hábitat remoto y anterior a la era clínica. De forma significativa, también presentó actividad antimicrobiana frente a catorce patógenos, entre ellos *Pseudomonas* y *Klebsiella*, lo que apunta a un potencial bioactivo relevante. El hallazgo consolida la idea de los hielos subterráneos como reservorios evolutivos de genes de resistencia y como fuentes aún inexploradas de biomoléculas con interés biomédico. ■



*Más información: https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1713017/full*

# REDES

### CCalfis Art

Este canal acerca la astronomía y la geografía al público joven mediante vídeos cortos de formato *shorts*, con un enfoque dinámico y divulgativo. A través de contenidos breves y visuales, combina entretenimiento y explicación científica para fomentar el interés por la ciencia en redes sociales.

### IFLScience

Una de las páginas de divulgación científica más seguidas en esta red social. Publica noticias, curiosidades, imágenes y datos llamativos sobre astronomía, biología, física y otras disciplinas, con un tono accesible y más divulgativo que técnico.

### @birloque

Jesús Pérez Gil, profesor de la Universidad Complutense de Madrid, bioquímico y biofísico, comparte análisis y comentarios sobre actualidad científica desde una perspectiva académica e institucional. Su tono combina reflexión, análisis crítico y contextualización de noticias científicas.

### @alta.ciencia

Una de las cuentas de divulgación científica visual por excelencia de la plataforma. Publica contenidos sobre fenómenos naturales, descubrimientos recientes y explicaciones breves de procesos científicos cotidianos, con especial atención al formato gráfico.

### @opedroloos

Con más de dos millones de seguidores, Pedro Loos, creador de contenido brasileño vinculado al proyecto de divulgación «Ciência Todo Dia», uno de los más populares de Brasil, produce contenidos sobre curiosidades científicas con un enfoque divulgativo, dinámico y apoyado en el humor.

## El CSN evalúa la autorización de explotación de Almaraz



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha recibido la información adicional solicitada al titular de la central nuclear de Almaraz para evaluar la petición de modificación de su autorización de explotación. Esta documentación fue requerida en diciembre mediante una Instrucción Técnica Complementaria, tras el análisis preliminar de la información disponible. La solicitud de informe preceptivo fue remitida al CSN por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en noviembre. El regulador evaluará la nueva documentación junto con informes previos, entre ellos la tercera Revisión Periódica de la Seguridad y los resultados del programa de inspecciones desde la renovación de la autorización en 2020. Las direcciones técnicas del organismo serán las encargadas de realizar el análisis. Si no se requiere información adicional, el Consejo prevé emitir su informe preceptivo al Ministerio durante el verano de este año. Este dictamen forma parte del procedimiento regulatorio previo a la adopción de decisiones sobre la autorización de explotación de la instalación ■

## CSN y Aemet refuerzan su colaboración estratégica en meteorología, seguridad nuclear y protección radiológica




El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet) refuerzan su colaboración estratégica mediante un nuevo convenio que actualiza y amplía el marco de cooperación iniciado en 2015. Firmado en noviembre de 2025, establece un marco de trabajo conjunto durante cuatro años en los ámbitos de meteorología, seguridad nuclear y protección radiológica. Entre sus principales líneas de actuación, figuran el intercambio de información técnica, la optimización de infraestructuras y la integración de datos meteorológicos en los modelos del CSN para la evaluación de riesgos radiológicos. El convenio contempla además la instalación de estaciones de la Red Revira del CSN en observatorios de la Aemet, así como el desarrollo de sistemas de aviso meteorológico específicos para los entornos de centrales nucleares. Ambas instituciones impulsarán estudios conjuntos sobre riesgos meteorológicos y contaminación radiológica, y participarán en ejercicios y simulacros de emergencia. Una comisión mixta paritaria supervisará el seguimiento del acuerdo, que no implica contraprestación económica y refuerza la coordinación institucional ante posibles incidentes nucleares. ■

## Marco regulador específico para el desarrollo seguro de la energía de fusión

Juan Carlos Lentijo, presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), ha subrayado la necesidad de desarrollar un marco regulador específico y proporcionado para garantizar el despliegue seguro de la energía de fusión. Durante la apertura del curso internacional *EU Fusion Safety and Regulation*, celebrado en Barcelona, destacó la importancia de anticipar los desafíos regulatorios asociados a esta tecnología emergente. Lentijo defendió el fortalecimiento de las capacidades técnicas de los organismos reguladores y el diálogo temprano con operadores y comunidad científica. Del mismo modo, señaló el papel de la cooperación europea, especialmente a través del Grupo de Reguladores Europeos de Seguridad Nuclear (ENSREG), para avanzar hacia enfoques regulatorios convergentes en la Unión Europea. En este contexto, anunció la futura creación de un grupo de trabajo específico sobre fusión, que asesorará a la Comisión Europea con el objetivo de establecer estándares de seguridad comunes que acompañen el desarrollo de esta tecnología, manteniendo elevados niveles de protección radiológica y ambiental. ■



## El regulador italiano refuerza la cooperación técnica con el CSN



Una delegación de la Inspección Nacional de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica de Italia (ISIN) visitó el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para afianzar la cooperación institucional entre ambos reguladores. El encuentro, encabezado por Juan Carlos Lentijo y Francesco Campanella, permitió analizar prioridades y desafíos comunes en materia de supervisión nuclear y radiológica. La reunión abordó los programas nacionales de gestión de residuos radiactivos y desmantelamiento desde la perspectiva reguladora. Ambas instituciones intercambiaron experiencias sobre los requisitos de seguridad y el papel del regulador en la supervisión de estas actividades. La agenda incluyó también una visita al centro de almacenamiento de residuos radiactivos de El Cabril, instalación de referencia internacional operada por ENRESA.

## ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

### Nuevo sistema de gestión dosimétrica para el personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) contratará un nuevo sistema de gestión dosimétrica destinado al control de la dosis recibida por el personal que interviene en emergencias nucleares y radiológicas. El contrato, que se tramitará mediante procedimiento abierto sujeto a regulación armonizada, contará con un presupuesto máximo de tres millones de euros. El sistema incluirá tres mil dosímetros de lectura directa, así como los equipos y programas necesarios para su configuración y gestión operativa. Además, permitirá el envío telemático de los datos dosimétricos a una base centralizada para su análisis y seguimiento. Esta herramienta complementará el sistema Dosi-app, actualmente utilizado en España para el control de dosis en situaciones de emergencia. Con esta iniciativa, el CSN refuerza las capacidades de monitorización radiológica del personal de intervención y mejora los sistemas de gestión de la información en escenarios de respuesta ante incidentes nucleares o radiológicos.



Acceso a todas las actas

## España y Portugal refuerzan su cooperación en seguridad nuclear y protección radiológica



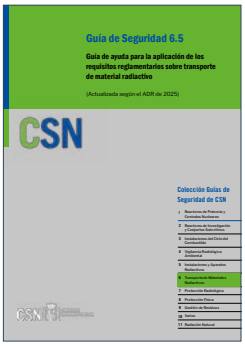
El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha mantenido una reunión bilateral en Oporto con sus homólogos portugueses, para reforzar la cooperación institucional en seguridad nuclear y protección radiológica entre ambos países. El encuentro permitió consolidar el marco de colaboración establecido en el Memorando de Entendimiento firmado en 2021 y avanzar en iniciativas como el intercambio de expertos y la participación conjunta en simulacros de emergencia. Ambas delegaciones abordaron cuestiones relacionadas con la gestión de residuos radiactivos, la supervisión de instalaciones médicas y la evolución normativa en el ámbito radiológico. También analizaron los resultados de la misión internacional IRRS-ARTEMIS del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) recibida por Portugal en 2025. La cooperación incluye el intercambio de buenas prácticas en la supervisión de fuentes radiactivas, el control del radón y la respuesta ante emergencias. Esta colaboración se enmarca en el Plan Estratégico del CSN 2026-2030 y refuerza la coordinación reguladora en la península ibérica.

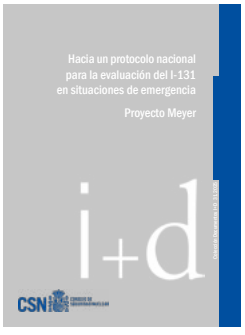
# ÚLTIMAS PUBLICACIONES











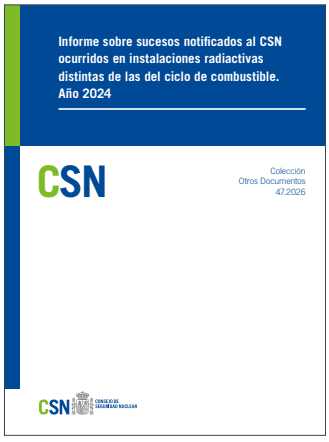












CSN ALFA **Revista de seguridad nuclear y protección radiológica** BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN

Institución/ Empresa

Nombre

Dirección

CP Localidad Provincia

Tel. Fax Correo electrónico

Fecha Firma

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear – Servicio de Publicaciones.** Pedro Justo Dorado Delmans, 11 · 28040 Madrid / FAx: 913460558 / peticiones@csn.es

**También puede suscribirse a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario *online*** [http://run.gob.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 > High-Intensity Laser Technology: New Capabilities for the Nuclear Industry

Ultra-intense laser systems are expanding the reach of nuclear technology, from experimental radioisotope production for medical imaging to new approaches in pulsed-field dosimetry, radioactive material analysis, decontamination, and fusion research

## REPORTS

### 14 > The Atlantic Trench: Radioactive Waste in the Ocean

From the historical dumping of radioactive waste in the Northeast Atlantic to today's international effort to locate the drums, assess their condition, and study radionuclide behavior in the deep-sea

### 22 > Smart Cities: Technology, Energy, and Governance for a New Urban Model

Urbanization, energy transition, and digitalization are reshaping the way cities are planned and managed, making data, interoperability, and institutional capacity just as important as the underlying technology

## INTERVIEW

### 30 > Jaime Domínguez Abascal

Professor of Mechanical Engineering at the University of Seville and President of the Royal Academy of Engineering

## TECHNICAL ARTICLES

### 35 > Regulatory aspects of small modular reactors (SMRs)

## SCIENCE AND SUPERHEROES

### 44 > From Radioactivity to Genetics: The Heroic Imagination of the Twentieth Century

Radioactivity, nuclear energy, genetics, and theoretical physics helped shape the modern superhero imagination — and a wider popular culture in which science appears at once as promise, threat, and transformation

## RADIOGRAPHY

### 50 > Meyer Project

National protocol for measuring and assessing I-131 doses in exposed populations during emergency situations

## CSN R&D

### 52 > Improving New AI Techniques for Anomaly Detection in Nuclear Reactors (INAIA)

New progress in neural-network-based methods for identifying and locating perturbations in reactor cores, with gains in accuracy and stronger potential for application to new geometries and reactor technologies

## ENTITIES

### 54 > IBM Quantum System Two

The first IBM Quantum System Two operating in Europe strengthens the Basque Country's push to position quantum computing as both scientific infrastructure

## NAMES IN SCIENCE

### 60 > Enrico Fermi, the elegance of simplicity

A look at one of the defining figures of twentieth-century physics, from his contributions to nuclear physics to the first self-sustaining chain reaction

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR



# ¡Conecta con nosotros!

https://twitter.com/CSN_es

https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear

https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/

http://www.csn.es

TRANSPARENCIA › COMUNICACIÓN › DIVULGACIÓN