



## iones contra el cáncer

**Sincrotrón Alba:**  
Diez años iluminando  
la intimidad de la materia  
mediante rayos X

**Elvira Romera Gutiérrez,**  
consejera del CSN:  
“La principal fortaleza  
del Consejo es el rigor e  
independencia de sus técnicos”

**Las misiones del Servicio  
Internacional de Asesoría  
en Protección Física (IPPAS)  
del OIEA**



# Video visita guiada al Centro de Información del CSN

Debido a la suspensión de las visitas al Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear, derivado de la situación creada por la covid-19, el CSN ha elaborado un vídeo simulando una visita guiada por la instalación de unos 25 minutos de duración, a la que se puede acceder a través del siguiente enlace: <https://www.csn.es/video-visita-guiada>

También se puede acceder a los diferentes módulos de la exposición a través del canal del CSN en YouTube.

YouTube



# La década de los cambios

inauguramos la nueva década del siglo XXI con el número 45 de *Alfa* en el que hablamos de una práctica –generada por la covid-19– que ha venido para quedarse y ha cambiado el paradigma de empresas e instituciones: el teletrabajo. En este sentido, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) mantiene a más del 80 % de su plantilla desempeñando sus funciones desde casa, pero en este reportaje también abordamos sus consecuencias y el futuro, tanto para empleadores como para empleados.

En este tiempo en el que la pandemia ha impulsado la aplicación en medicina de la tecnología de la impresión en 3D, esta técnica ha encontrado un camino insospechado, el de los reactores nucleares. El pasado mayo, la multinacional Westinghouse instaló dentro de un reactor nuclear comercial en Estados Unidos el primer componente creado con esta tecnología en tres dimensiones.

Por otra parte, este año se celebra el décimo aniversario de la inauguración de un acelerador de partículas único en nuestro país, el sincrotrón Alba. Es una de las mayores infraestructuras científicas de España, en la que se produce un haz de luz invisible a nuestros ojos para llegar a la estructura básica de la materia. En *Alfa* hacemos un repaso de su evolución en esta década y miramos al futuro de los sincrotrones de cuarta generación.

Otro tipo de aceleradores de partículas, los adaptados a la medicina y que emplean iones, han revolucionado los tratamientos contra el cáncer pues reducen el riesgo de los efectos secundarios de otras formas de radioterapia. Incluimos un reportaje en *Alfa* sobre estas instalaciones, de las que, de momento, solo cinco países cuentan en sus hospitales con ellas. Sus enormes dimensiones requieren

*El Consejo de Seguridad Nuclear mantiene a más del 80 % de su plantilla desempeñando sus funciones desde casa*

una gran inversión a largo plazo hasta que se consiga reducir su tamaño.

El futuro pasa por un pequeño pueblo de Granada, Escúzar, que aspira a albergar la instalación IFMIF-DONES, esencial para conseguir la fusión nuclear. En este número de nuestra revista describimos cómo es este proyecto, que busca allanar el camino de la fusión si consigue resolver el problema de los

materiales que deberán soportar las radiaciones que se producirán en el interior de los reactores.

La consejera del CSN Elvira Romera aborda en las páginas de la entrevista los retos del futuro más próximo del regulador –como la transformación digital– y destaca la rigurosidad de la labor que desempeñan los técnicos del Consejo.

Como cierre a la parte más divulgativa ofrecemos un reportaje sobre la banda sonora de la era atómica en EE UU. Desde Bob Dylan hasta Crosby, Stills & Nash repasamos la euforia inicial tras las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki hasta el temor cuando la URSS desarrolló esa tecnología pocos años después.

En artículos técnicos describimos las actividades y la normativa de supervisión del CSN en la formación del personal con licencia de operación de las centrales nucleares y de la fábrica de combustible de Juzbado. La formación de sus operadores es fundamental en el mantenimiento de la seguridad de las instalaciones nucleares.

Otro tipo de seguridad, la denominada seguridad física, ocupa otro artículo técnico de *Alfa*. En él se describe cómo se llevan a cabo las misiones del Servicio Internacional de Asesoría en Protección Física (IPPAS por sus siglas en inglés) que ofrece el Organismo Internacional de Energía Atómica a sus estados miembros. 

## ALFA

Revista de seguridad nuclear  
y protección radiológica  
Editada por el CSN  
Número 45  
Febrero 2021



**Comité Editorial**  
Josep Maria Serena i Sender  
Pilar Lucio Carrasco  
Francisco Castejón Magaña  
Elvira Romera Gutiérrez  
Rafael Cid Campo  
M<sup>a</sup> Fernanda Sánchez  
Ojanguren  
David Redoli Morchón  
Ignacio Martín Granados  
Ignacio Fernández Bayo

**Comité de Redacción**  
Ignacio Martín Granados

Natalia Muñoz Martínez  
Vanessa Lorenzo López  
Adriana Scialdone García  
Arturo Fernández García  
Juan Enrique Marabotto García  
Ignacio Fernández Bayo

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

**Coordinación editorial**  
Divulga S.L.  
C/Diana, 16  
28022 Madrid

**Fotografías**  
CSN, Divulga, OIEA,  
DepositPhotos.

**Impresión**  
Editorial MIC  
C/Artesiano s/n  
Pol. Ind. Trabajo del Camino  
24010 León

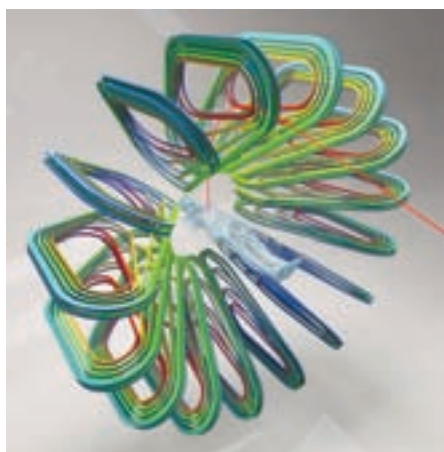
**Fotografía de portada**  
Hospital Universitario  
de Heidelberg.

Depósito legal: M-24946-2012  
ISSN-1888-8925

© Consejo de Seguridad Nuclear

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

## REPORTAJES



### 6 Iones contra el cáncer

Nuevos aceleradores de partículas han entrado en los hospitales para revolucionar los tratamientos de radioterapia y destruir tumores. No obstante, aunque los resultados en los ensayos clínicos son prometedores, las dimensiones y el precio de los aparatos dificultan su implantación en los hospitales.

### 12 Rayos X para iluminar la intimidad de la materia

El sincrotrón Alba, el único existente en España, cumple diez años, durante los cuales ha contribuido importantes investigaciones en ámbitos como la biología molecular, la ciencia de materiales, el medio ambiente y el estudio del patrimonio. Ahora afronta una remodelación para que siga perteneciendo a la élite europea.

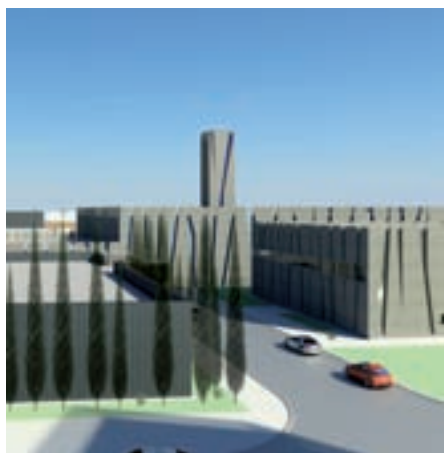


### 34 La semilla que germinó con la pandemia

El teletrabajo, una fórmula laboral secundaria hasta hace un año, se ha convertido en una opción mayoritaria para el futuro de la mano de la covid-19, cuyas consecuencias psicológicas, económicas, sociales y ambientales apenas han empezado a esbozarse. El CSN se ha adaptado a la nueva situación sin problemas.

### 40 El futuro de la impresión 3D es ya el presente

La pandemia ha permitido que la tecnología de la impresión en tres dimensiones despegara definitivamente gracias a sus aplicaciones en medicina. Pero este año, la impresión 3D también se ha abierto camino en el sofisticado mundo de los reactores nucleares.



### 52 El camino granadino a la fusión nuclear

El pequeño municipio de Escúzar, en Granada, podría tener un papel crucial en la consecución de la fusión nuclear. Esta localidad es la favorita para acoger la instalación IFMIF-DONES, donde se estudiarán materiales capaces de resistir la intensa radiación que producen las reacciones de esta futura fuente de energía.

### 62 La banda sonora de la era atómica (1945-1969)

La música popular estadounidense reflejó el impacto que produjo en la población americana la era atómica y su evolución. Desde la euforia inicial tras el lanzamiento de las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki hasta el temor cuando la URSS desarrolló esa tecnología pocos años después.

## RADIOGRAFÍA

### 26 **Primera intervención ante un incidente con material radiactivo**

Decálogo de actuación ante un incidente con material radiactivo: para qué se utilizan las fuentes radiactivas, cuáles son los principios básicos de protección frente a la radiación y cómo se debe actuar ante una situación accidental.

## ENTREVISTA

### 28 **Elvira Romera Gutiérrez, consejera del CSN**

“La principal fortaleza del Consejo reside en el gran rigor e independencia de sus técnicos”

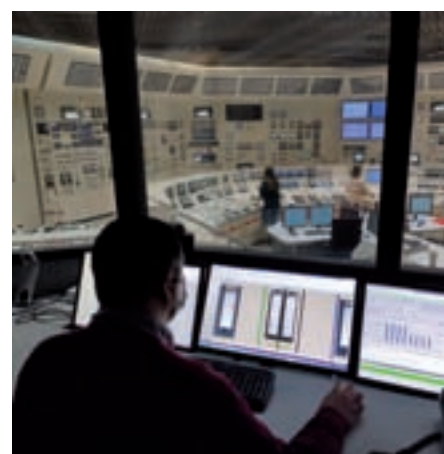
## ARTÍCULOS TÉCNICOS

### 20 **Concesión y supervisión por el CSN de los procesos de formación de las licencias de operación de centrales nucleares y de la fábrica de combustible nuclear de Juzbado**

La actuación humana es fundamental para el mantenimiento de la seguridad en las centrales nucleares. Con el fin de lograr la adecuada capacidad de los operadores, el Consejo de Seguridad Nuclear supervisa la formación del personal con licencia de operación de las instalaciones.

### 46 **Las misiones del Servicio Internacional de Asesoría en Protección Física del OIEA**

El Organismo Internacional de Energía Atómica creó las misiones IPPAS para evaluar la seguridad física nuclear de los Estados miembros que lo soliciten. Desde su creación hasta finales de 2019, más de 140 expertos, pertenecientes a 36 países, han llevado a cabo un total de 90 misiones.



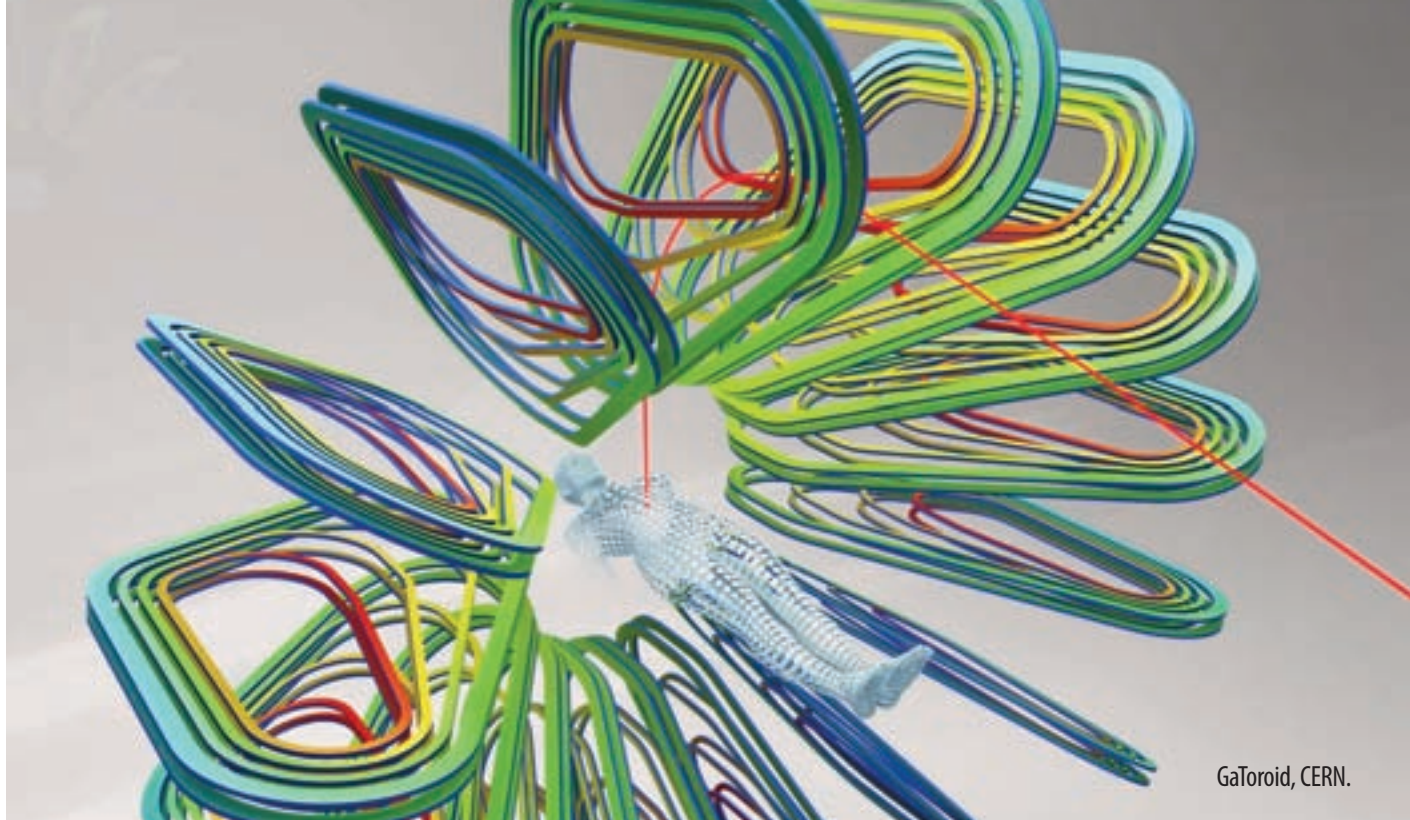
### 58 **Reacción en cadena**

### 66 **Panorama**

### 69 **Acuerdos del Pleno**

### 70 **Publicaciones**

### 71 **Abstracts**



Nuevos aceleradores de partículas entran en los hospitales para revolucionar los tratamientos de radioterapia y destruir tumores

## Iones contra el cáncer

El desarrollo de los aceleradores de partículas adaptados a la medicina ha puesto al alcance de la comunidad científica una herramienta eficaz en el tratamiento del cáncer. Conocida como radioterapia de hadrones, la aplicación de haces de protones y, sobre todo, de iones pesados de carbono en tumores resistentes, consigue su desintegración y reduce el riesgo de los temidos efectos

secundarios de la radioterapia convencional. Los resultados en los ensayos clínicos son prometedores. De momento, solo cinco países cuentan en sus hospitales con estos aceleradores. Sus enormes dimensiones requieren una gran inversión a largo plazo hasta que se consiga reducir su tamaño.

■ Texto: **Mar de Miguel** | Periodista científica ■

La palabra cáncer no es sinónimo de muerte. Aunque según la Organización Mundial de la Salud, esta enfermedad aún es responsable de la pérdida anual de 9,5 millones de vidas humanas, la biomedicina genera innumerables tratamientos que controlan su agresividad. Los avances en quimioterapia, radioterapia e inmunoterapia ofrecen un horizonte de esperanza para aquellos que la padecen. Hoy, para muchos pacientes, esta dolencia se ha vuelto crónica; para otros, ha desaparecido.

La Sociedad Americana contra el Cáncer distingue 56 tipos de cáncer, de los cuales, según estadísticas mundiales, los de pulmón, mama, próstata y colon presentan una mayor incidencia. Entre los más difíciles de tratar están el de ovario, el de tiroides y la leucemia linfocítica crónica. Pese a los avances, algunos tumores no responden a los tratamientos; en ocasiones por la propia biología de órganos vitales, como el páncreas; otras veces porque se detectan tarde o se localizan en zonas inaccesibles, como el ce-

rebro; o porque producen metástasis. Para ellos, las nuevas técnicas de radioterapia podrían ser su única opción.

Sin embargo, la radiación todavía es vista con recelo por sus temidos efectos secundarios. La última palabra la tienen los aceleradores de partículas, adaptados a la medicina para revolucionar el panorama de la próxima década. Es lo que se conoce como terapia de hadrones, que a diferencia de la radioterapia convencional (que usa fotones de alta energía producidos por electrones acelerados), se

basa en haces de partículas cargadas (protones e iones pesados).

Los tratamientos actuales contra el cáncer son diversos. La cirugía tradicional cuenta con tomografías computarizadas e imágenes de resonancia magnética que localizan un tumor con toda precisión. Durante la operación, el láser se suma al bisturí del cirujano, mientras brazos robóticos guían su pulso hacia puntos exactos de cavidades recónditas. Para que a sus ojos no escape ninguna célula a extirpar, se han desarrollado fármacos que se unen al tejido canceroso y brillan en el quirófano cuando se observan con un endoscopio de fluorescencia. La inyección de OTL38 ofrece imágenes intraoperatorias en el rango del infrarrojo cercano, ejemplo de los sofisticados métodos que se prueban en ensayos clínicos.

La quimioterapia tampoco se queda atrás, apoyada por la inmunoterapia o la terapia génica. Todas ellas son selectivas: apuntan a un tipo concreto de células; bloquean moléculas determinadas; contrarrestan y silencian genes específicos o se diseñan para un único paciente. En paralelo, la radioterapia busca fuentes más penetrantes y a la vez menos dañinas, que respeten los tejidos sanos, pero que bombardeen los tumores en su totalidad. Con la hadronterapia, se pretende depositar una dosis de radiación solo letal para las células tumorales, guiando el haz hacia un punto concreto y solo ese, lo que aumenta la probabilidad de una cura certera, duradera y sin secuelas.

La clave de estas armas está en el nuevo enfoque de la oncología, que se personaliza porque cada cáncer es distinto y cada paciente es un mundo. “Cada persona tiene un cáncer diferente. Se parecen celularmente pero no son iguales a nivel molecular ni mutacional”. Son las palabras de Felipe Calvo, director de la Unidad de Protonterapia de la Clínica Universidad de Navarra, uno de los dos centros de hadrones españoles.

## Del acelerador al tumor

La hadronterapia consta de una fuente de protones o de iones pesados (principalmente  $C^{6+}$ ) que entran en un acelerador lineal de partículas. En esta fase se aceleran de alta a baja energía. En la segunda etapa, protones o iones van a otro acelerador (un ciclotrón o un sincrotrón) donde pasan de baja a alta energía. En el ciclotrón, el campo magnético y el eléctrico son constantes y el movimiento es espiral. En el sincrotrón, cuatro imanes producen trayectorias circulares y un campo eléctrico aumenta su velocidad. La tercera fase focaliza el haz de protones o de iones en el tumor.

El aparato que realiza esto último se conoce como gantry. Puede ser fijo o girar 360°. Su peso ronda las 600 toneladas, por lo que conviene reducirlo. En la actualidad, el equipo de Luca Bottura, jefe del Grupo de Imanes de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) ha ideado un modelo toroidal

llamado GaToroid. “El GaToroid es un concepto patentado por el CERN”, expone Frédéric Bordry, director de Aceleradores y Tecnología de esta institución. “Solo existe sobre el papel, pero, si funciona, podría disminuir el tamaño del gantry a 12 toneladas para protones y a 50 toneladas para iones de carbono”.

El GaToroid no necesita moverse. Por su sistema de arcos gira el haz que luego se deposita sobre el paciente desde distintos ángulos. “Ahora debemos probar que funciona. Hemos obtenido la patente sin hacer una demostración. Tenemos cinco años para conseguirlo”, añade Bordry.

## Destruir la célula cancerosa

La última etapa en radioterapia se produce en el paciente. Antes, se necesitan estudios de imagen para dirigir la dosis. Es un paso crítico. Los órganos del paciente se mueven, como el pulmón. Por ello, las redes neuronales y la inteligencia artificial anticipan su dinámica.



Terapia de iones. Hospital Universitario de Heidelberg, Alemania.

## Radioterapia con protones

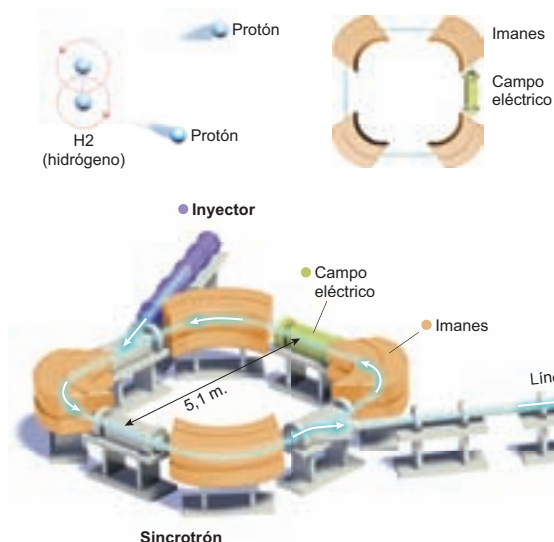
La Clínica Universidad de Navarra cuenta en Madrid con el equipamiento más avanzado de Europa para la radioterapia de protones. Es una terapia más precisa y minimiza el daño a los órganos sanos que rodean al tumor.

### 1. INYECTOR

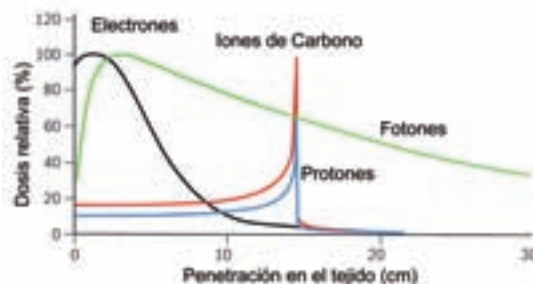
Los protones se extraen de moléculas de hidrógeno y se introducen en un acelerador lineal que los inyecta en el sincrotrón.

### 2. SINCROTRÓN

Cuatro imanes mantienen los protones en trayectorias circulares y un campo eléctrico incrementa gradualmente su velocidad.



Representación del pico de Bragg.



### 3. EXTRACCIÓN

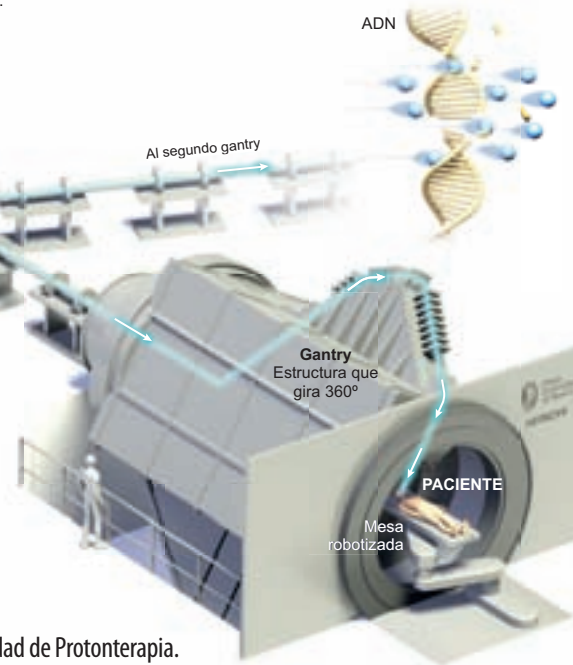
Cuando han alcanzado una velocidad próxima a la de la luz se desvían a la línea de haz para ser conducidos a la sala de tratamiento.

### 4. GANTRY

Los protones llegan a uno de los dos gantries, en cuyo centro se ha posicionado al paciente.

### 5. RADIOTERAPIA

El haz lesiona el ADN e ioniza otras moléculas de las células cancerosas, inactivando el tumor.



Fotones, protones o iones pesados inducen la muerte de las células tumorales tras romper la doble cadena de ADN. Los tumores poseen células en división que sufren en mayor grado estas roturas porque tienen mucho ADN. Además, a diferencia de las células sanas, las tumorales tienen limitada su capacidad de reparación genómica.

En cuanto a la interacción con los tejidos que atraviesan, los fotones se atenúan exponencialmente al traspasar el cuerpo. Entregan más dosis en la su-

perficie que donde está el tumor, una desventaja compensada irradiando desde varias direcciones, minimizando la dosis en superficie y maximizándola en profundidad.

Los protones llegan al paciente muy acelerados y depositan poca energía al cruzar las primeras células. Luego se ralentizan y alcanzan una densidad de io-

Unidad de Protonterapia.  
Clínica Universidad de Navarra, España.

nización muy alta que se conoce como pico de Bragg, momento en el que liberan su energía. “Con los protones no hay dosis de salida después del tumor, lo que reduce su toxicidad”, destaca Alejandro



Equipo Quirón (izquierda) y sincrotrón del CNAO (Italia).



Mazal, director de Física Médica del Centro de Protonterapia de Quirón Salud, el primero inaugurado en España.

Los iones de carbono frenan más rápido que los protones. Por ello requieren energías enormes de grandes aceleradores. Tienen otra desventaja: liberan energía tras el pico de Bragg, lo que se aprecia como una cola de efecto indeseado para el tejido que alcance. No obstante, su densidad de ionización es superior a la de los protones, lo que le confiere una eficacia biológica mayor para atacar un tumor. “Los protones son importantes por su balística y el carbono por su biología”, plantea Mazal.

Protones e iones abren un campo de estudio en la medicina oncológica. Sin embargo, la radioterapia convencional aún evoluciona con los años y se mantiene como herramienta de vanguardia, recalca.

### Radioterapia de protones

La Clínica Universidad de Navarra es el segundo centro inaugurado en España que dispone de radioterapia con protones. Desde marzo han tratado a 80 pacientes, pero aún es pronto para hablar de resultados. “Es preciso esperar un mínimo de seis a ocho meses”, indica Felipe Calvo. Dado que los protones son menos tóxicos y más precisos que los fotones, en términos de tolerancia, “tenemos datos excepcionalmente buenos”, destaca.

En Estados Unidos, Nadia Laack, directora del Departamento de Oncología Radiológica de la Clínica Mayo de Rochester, combina distintos tratamientos de radioterapia para pacientes pediátricos y adultos. Trata tumores cerebrales, de tejidos blandos y de hueso con terapia de radionucleidos, radiocirugía estereotáxica, radioterapia de protones y radioterapia de partículas pesadas.

La lista de los efectos adversos que Laack y su equipo superan es interminable. En el cerebro registran un menor riesgo de alteración endocrina, de visión



De arriba a abajo: Nadia Laack (Clínica Mayo), Frédéric Bordry y Luca Bottura (CERN).

Dispositivo experimental del grupo de la Universidad de Granada para irradiación de células con neutrones en la línea PF1b del reactor de ILL (Grenoble).

## El renacer de los neutrones

La radioterapia se aplica de distintas formas. En la radioterapia externa, un haz incide desde fuera al interior del tumor. La braquiterapia usa implantes de isótopos radiactivos en contacto con las células tumorales. En la radiación sistémica se administran radiofármacos por vía oral o venosa.

Entre la radiación externa y la sistémica está la Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT), arrinconada durante décadas por sus efectos secundarios. La BNCT consiste en la inyección de un fármaco que contiene boro y que se une selectivamente al tejido canceroso. Al irradiar con neutrones el boro interacciona, destruye las células tumorales, pero no las sanas. Se usa en tumores difusos, inviables para la radioterapia externa por carecer de una forma definida donde dirigir la radiación.

Esta técnica se desarrolló en reactores nucleares. Ahora se usan pequeños aceleradores. Por otro lado, el estudio del efecto de los neutrones en las células ha permitido a los científicos advertir que, en lugar de usar neutrones térmicos (muy lentos), tendrían que haber usado neutrones epitérmicos (más rápidos), que se frenan en el tejido sano, pero llegan al tumor.

Pasar de reactores a aceleradores y de neutrones térmicos a epitérmicos ha permitido el renacer de la BNCT. Los neutrones vuelven a los hospitales tras mejorar su seguridad y reducirse los costos. “Se están desarrollando aceleradores en varios países. En Argentina lo hacemos, para instalarlos en hospitales y poner la fuente de neutrones a disposición de los médicos”, dice Andrés Kreiner, jefe del Departamento de Tecnología y Aplicaciones de Aceleración de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina. Kreiner dirige la creación de este acelerador que también instalará Corea del Sur.

Existen aceleradores para BNCT en Japón, China y Finlandia, donde comenzarán a tratar pacientes. En la Universidad de Granada, un grupo investiga la producción de neutrones óptimos, busca fármacos específicos contra tumores y recoge datos nucleares y radiobiológicos para mejorar la precisión de la técnica durante la planificación del tratamiento. Los experimentos se hacen junto con el Hospital Virgen de las Nieves de Granada, en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla, en el CERN y en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble.

Este equipo quiere pasar a los ensayos clínicos. “Hemos diseñado una instalación de BNCT (proyecto Némesis) para su construcción en Granada. Se lo hemos presentado a la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía, que lo ha acogido con interés”, confirma Ignacio Porras, catedrático del Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de dicha universidad. ▶

o audición. Para el cáncer de cabeza y cuello se reducen los ingresos hospitalarios, los fármacos intravenosos o las sondas de alimentación. En el tórax disminuyen los problemas cardíacos, pulmonares y las complicaciones postoperatorias tras cirugía y radiación. En cuanto a la secuela más temida, el cáncer provocado por la propia radiación, en comparación con los fotones, “los protones están asociados a una reducción del 50 % en todas las regiones del cuerpo”, asegura Laack.

## La era de los iones

Para Nadia Laack, “los datos con iones de carbono son aún más prometedores”. En oncología pediátrica son eficaces en tumores difíciles de tratar o aquellos para los que la cirugía “no es posible sin una morbilidad inaceptable”. Hace más de una década que la Clínica Mayo colabora con Japón, referente mundial en ensayos clínicos con iones.

En los Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuántica y Radiológica de Japón (QST, por sus siglas en inglés) se tratan más de 15 tipos de cáncer con iones de carbono. Desde junio de 1994 y hasta marzo de 2020, por el QST han pasado 12.710 pacientes. El cáncer de próstata es el más tratado (28,8 %), seguido del de cáncer de hueso y tejido blando (0,4 %), cabeza y cuello (9,9 %), pulmón (8,6 %) y páncreas (6 %). La supervivencia depende del tipo de tumor y de la fase del ensayo. De cáncer de próstata, “entre junio de 1995 y julio de 2018, se trataron 3.077 pacientes. Las tasas de supervivencia global a 5 y 10 años fueron del 95,8 % y del 85 % respectivamente”, informa QST.

Científicos de los institutos QST acaban de publicar en la revista *Clinical and Translational Radiation Oncology* el primer estudio de reirradiación con iones de carbono y quimioterapia para el cáncer recurrente de páncreas. “La irradiación curativa es posible incluso con reirradiación en tumores de cabeza y cuello, huesos y te-



Felipe Calvo. Unidad de Protonterapia de la Clínica Universidad de Navarra.

jidos blandos, cáncer de pulmón, de hígado o de páncreas”, indica Shigeru Yamada, coautor del trabajo. “Recientemente, como ensayo clínico, hemos comenzado la reirradiación para la recurrencia del cáncer de próstata”. Estos investigadores abren la puerta al tratamiento de los cánceres más letales, reirradiando, usando distintas dosis de carbono, oxígeno y helio y apoyándose en la quimioterapia.

En los institutos QST, otras líneas de investigación se centran en la fuerte activación de la inmunoterapia a través de irradiación con iones para controlar el desarrollo de metástasis. Por otro lado, desde 2017, desarrollan un bisturí cuántico “con el objetivo de miniaturizar la instalación de radioterapia de iones pesados y maximizar el efecto terapéutico. El tamaño del dispositivo original es el de un campo de fútbol. El tamaño de la tercera generación es ya de un tercio”, ha avanzado Yamada.

### Una docena de centros en el mundo

Veinte países concentran los 97 centros de protonterapia que existen en el mundo. España cuenta con dos en Madrid: Quirón Salud (inaugurado en 2019) y la Clínica Universidad de Navarra (2020).

De iones solo existen 12 centros: seis en Japón, dos en China, dos en Alemania, uno en Italia y uno en Austria. Otros seis están en construcción, sumándose Francia, Taiwán y Corea del Sur.

Destaca la ausencia de Estados Unidos. El país que descubrió la radioterapia de iones en 1975 no posee ninguna instalación. “La razón principal por la que no hay un centro de iones en Estados Unidos es el costo”, afirma Nadia Laack. La revista estadounidense *Wired* menciona la falta de fondos federales y Laack desvela un motivo adicional: su particular sistema de salud. “Una razón secundaria es la complejidad de nuestro sistema de reembolso”. Las instalaciones de iones son enormes y requieren una gran inversión para su construcción, el personal y para establecer los modelos de reembolso.

El único proyecto norteamericano es el de la Clínica Mayo, que planea edificar un centro en Jacksonville, Florida y pretende acabarlo en 2025. “La planificación continúa según lo programado a pesar de las dificultades causadas por las restricciones de viaje durante la pandemia”, explica Laack. Su equipo quiere comenzar los tratamientos de iones de carbono en 2027.

En España, Mevion Medical quiere

construir un centro de protones en Córdoba. Además, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y el CERN colaboran para desarrollar aceleradores de iones de carbono. La idea es traer a nuestro país esta tecnología, confirma José Manuel Pérez, director del Departamento de Tecnología del Ciemat.

El proceso es complejo, largo y necesita que se involucren distintas instituciones. “España necesita un centro de iones y de protones necesita más. El Ciemat está haciendo un esfuerzo por preparar la tecnología necesaria para que esté disponible en caso de que la comunidad clínica y las instituciones estén de acuerdo con ello”, asevera Pérez. El Ciemat quiere simplificar el sistema de aceleración y abaratar los costes para hacerlo clínicamente viable.

### Estrictas normas de seguridad

Quirón Salud y la Clínica Universidad de Navarra han creado sus propios procedimientos de seguridad radiológica para sus instalaciones. La primera tiene un sincrociclotrón y la segunda un sincrotrón, dos aceleradores diferentes con mecanismos de seguridad particulares. El CSN revisa las acciones de ambos centros para que cumplan la ley vigente y hay normas comunes para los dos.

En sus salas hay señalizaciones acústicas y luminosas, control de accesos, detectores de neutrones y de fotones, botones de emergencia para interrumpir el haz o circuitos que completar antes de salir de cada habitáculo. “De cara al paciente, cuando el haz incide en el tejido, se generan isótopos que tienen un periodo de vida muy corto y que en poco tiempo dejan de ser radiactivos. El uso del dosímetro es obligatorio y hay dos: uno para detectar fotones y otro para detectar neutrones”, explica la doctora Verónica Morán, especialista del Servicio de Radiofísica y Protección radiológica de la Clínica Universidad de Navarra.





Un repaso a las utilidades del sincrotrón español Alba, diez años después de su inauguración

## Rayos X para iluminar la intimidad de la materia

La mayor infraestructura científica de España, con permiso del Gran Telescopio de Canarias, es un generador de luz gigantesco. Su nombre es Alba y es un sincrotrón de 30.000 metros cuadrados que produce rayos X millones de veces más potentes que las fuentes convencionales. Un haz constante que ilumina distintos puntos de observación, algunos de ellos únicos en el mundo, para desnudar la materia hasta dejar visible su estructura molecular y atómica. El resultado son imágenes del minúsculo mundo nanométrico (un nanómetro es una millonésima de un

milímetro) nítidas, en 3D y obtenidas en minutos —en lugar de meses— que han revolucionado muchos campos de la ciencia, desde la biología y la medicina hasta la física de materiales. Este acelerador de partículas tan especial, el único en nuestro país, cumple 10 años con más del doble de peticiones para usar sus instalaciones de las que puede atender, y con una remodelación profunda, el Alba II, puesta en marcha en diciembre pasado para continuar perteneciendo a la élite de Europa.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | Periodista de ciencia ■

**D**iez años llevan los vecinos de Cerdanyola del Vallès (Barcelona) conviviendo con lo que a vista de pájaro es un gran platillo volante aterri-

zado en un claro entre sus carreteras y edificios, que parecen diminutos a su lado. Solo que de sus puertas no salen amenazantes alienígenas, sino “conocimien-

to y datos útiles que ayudan a resolver retos de la sociedad”. La que habla es Caterina Biscari, la comandante en jefe de esta mole de hormigón de 22.870 metros



cuadrados, bajo la que se encuentra el único sincrotrón de España.

Se trata de un acelerador de partículas muy especial. Es circular, como su hermano mayor, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), pero sus funciones son completamente distintas. El suizo acelera protones e iones pesados para que choquen entre ellos y la energía generada produzca nuevas partículas que permitan estudiar el mundo cuántico. El objetivo del sincrotrón es producir luz. No cualquier tipo, sino una invisible a nuestros ojos: un haz de rayos X tan intenso y constante que, acoplado a aparatos de observación de última generación instalados en la propia infraestructura, es capaz de iluminar con nitidez lo pequeñísimo: la estructura básica de la materia y sus ladrillos, las moléculas y átomos de los que está compuesta. Así se consigue determinar su forma, estructura y comportamiento.



SERGIO RUIZ

Arriba, vista sobre la pasarela del hall experimental del Sincrotrón; abajo, edificio principal.

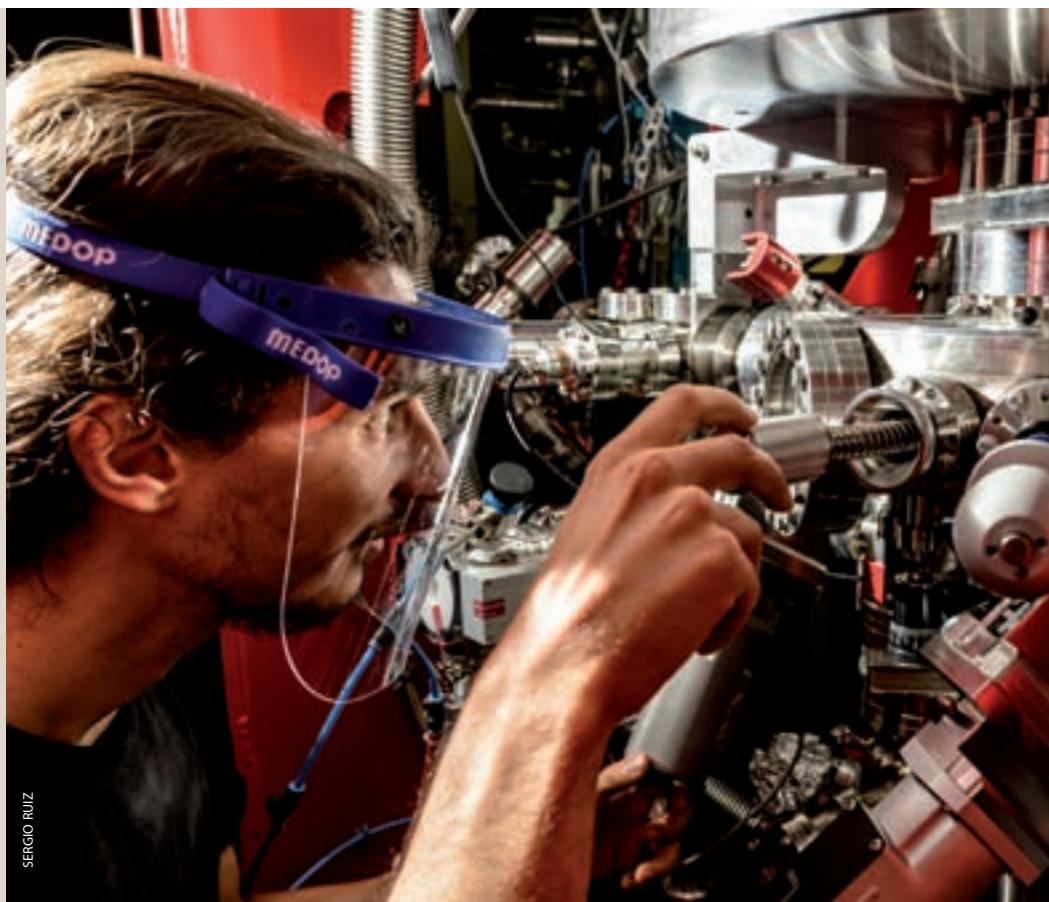
## El Alba en cifras

Supuso una inversión de 201 millones de euros, financiados a partes iguales por el Gobierno de España y la Generalitat de Cataluña.

Se inauguró el 23 de marzo de 2010 y comenzó a funcionar en 2012.

Posee tres aceleradores de electrones: uno lineal (llamado, LINAC), de 100 MeV de energía; y los otros dos circulares (de Alimentación y de Almacenamiento) de 3 GeV cada uno. Desde este último sale la luz sincrotrón.

Tiene ocho líneas de luz, cada una especializada en un tipo de técnica experimental, caracterizado por una energía y flujo diferentes; y un sistema óptico distinto.



Estación experimental de la línea de luz BOREAS del Síncrotrón Alba.

Por eso se le bautizó con el nombre de Alba. “La primera luz del día antes de salir el sol”, según la Real Academia Española. Unos fotones que emiten los electrones cuando se aceleran, más energéticos cuanto más deprisa van. En este caso, se fuerza a que giren a casi 300.000 km/s, la velocidad de la luz, por un anillo de 270 metros en el que reina el vacío. De esta manera, las partículas cargadas alcanzan una energía inusual, 3 GigaelectronVolts (mil millones de veces más energético que la luz visible), cifra que sólo se consigue en apenas una treintena de sincrotrones diseminados por el planeta.

Aunque no es sólo su “corazón de luz”, sino también lo que los equipamientos permiten hacer con ella lo que convierten al Alba “en un sincrotrón por encima de otros europeos y, desde luego, a la cabeza de la región mediterránea”, según Biscari. Las 6.000 horas de luz

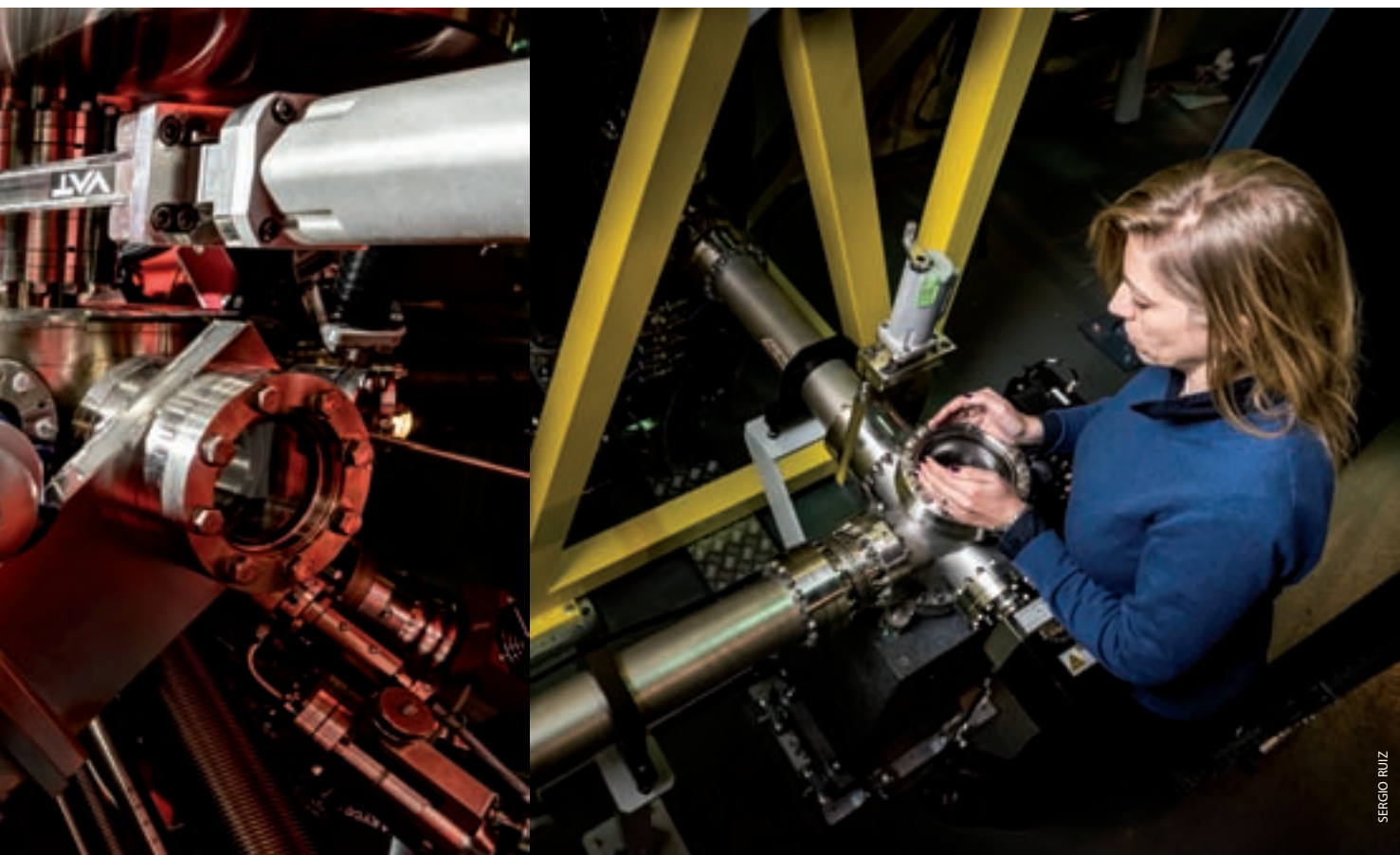
síncrotrón al año iluminan ocho laboratorios (llamados líneas de luz), cada uno con equipos de observación especializados en ver cosas distintas. Algunos son únicos en el mundo y atraen a científicos de todos los confines para estudiar superconductores y materiales electrónicos. Otros son referentes internacionales pues trabajan como los TAC médicos, aunque radiografían objetos 100.000 veces más pequeños. Permite obtener imágenes en 3D de células y moléculas, muy útil en medicina y ciencia de materiales magnéticos. Medio ambiente, biomedicina, alimentación, patrimonio cultural... “Las aplicaciones son infinitas”, añade la investigadora. Veamos algunas.

### Frenar al SARS-CoV-2

“La vida es química: nada más y nada menos”, dijo en una ocasión Roger Kornberg, que recibió el Premio Nobel de Química

en 2006 por descifrar la estructura tridimensional de la proteína ARN polimerasa, pieza clave en la transcripción de la información genética. Lo consiguió gracias a la luz sincrotrón. La misma fuente de radiación que se está utilizando ahora para buscar los puntos débiles del SARS-CoV-2. El objetivo es encontrar fármacos eficaces que inutilicen sus proteínas diana —las llaves que le permiten introducirse dentro de la célula—, o que alteren alguno de los parámetros clave en su ciclo de vida para impedir su crecimiento exponencial.

En el Alba un equipo del Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB) ha demostrado que algunos de los antitumorales más utilizados, como el paclitaxel, bajan la replicación del coronavirus. Estos fármacos son conocidos por afectar a la estructura de los microtúbulos, unos biopolímeros en forma



Línea de luz MIRAS para estudiar tejidos a través de espectroscopia y microscopía infrarroja.

de filamentos que se encuentran dentro de las células a modo de esqueleto interno. “También son las carreteras celulares por las que se mueven los virus”, cuenta Fernando Díaz, responsable del Grupo de Agentes Estabilizantes de Microtúbulos del CIB. Gracias a la luz sincrotrón, pudieron observar que al alterar estas fibras se retrasaba el movimiento viral y, en consecuencia, la infección.

Pese a que no han encontrado un candidato que anule completamente el desplazamiento del coronavirus -como sí parece que lo hace el plitidepsin descubierto hace pocas semanas por la farmacéutica PharmaMar-, sí sería eficaz si se suministra junto con antivirales conocidos, como el remdesivir (primer fármaco autorizado para el tratamiento de la covid-19). Todavía hay que investigar más, pero se trata de una línea prometedora que podría lograr “un antiviral de amplio espectro”, ya que

este mecanismo no es exclusivo del SARS-CoV-2, puntualiza el científico.

“Con el sincrotrón hemos podido visualizar cambios sutiles de décimas de



Caterina Biscari.

angstrom (en un centímetro caben 100 millones de angstroms) en los microtúbulos. Inapreciables con otras técnicas

salvo con microscopios electrónicos de última generación, pero eso nos hubiera retrasado enormemente”, señala. Se refiere al hecho de que con estos aparatos se necesitan días para procesar una sola muestra, “mientras que con el sincrotrón se analiza una cada 15 minutos”. Cuanta más luz se ponga en una muestra, más rápido se mide. “En un día hemos evaluado 50 variantes de un fármaco promotor, al que le vamos introduciendo pequeños cambios químicos”. Así, “los resultados se obtienen en ocho meses en lugar del par de años que hubiéramos tardado normalmente”, concluye.

Otra de las ventajas del sincrotrón es que la degradación de las muestras es muchísimo menor, según este investigador. Se han podido estudiar las fibras en condiciones casi fisiológicas, sin necesidad de congelarlos, teñirlos, fijarlos o cristalizarlos. Este también fue uno de los

alicientes para que científicos del Centro Nacional de Biotecnología optaran por el sincrotrón Alba para obtener el primer mapa tridimensional de células infectadas con hepatitis C, la causa más común de trasplante de hígado en el mundo. También gracias a su luz observaron las alteraciones provocadas por el virus y cómo se recuperaban después de tratarla con fármacos.

### Contra el cambio climático

Aunque parece que la pandemia que vivimos es la peor amenaza que tenemos, todavía queda enfrentarnos al cambio climático, según alerta la comunidad científica en un artículo de *Nature*. Uno de sus precursores es el plástico, responsable de emitir 1,34 gigatoneladas de gases de efecto invernadero al año, lo mismo que 300 centrales eléctricas de carbón de 500 megavatios, según un reciente estudio del Centro para el Derecho Ambiental

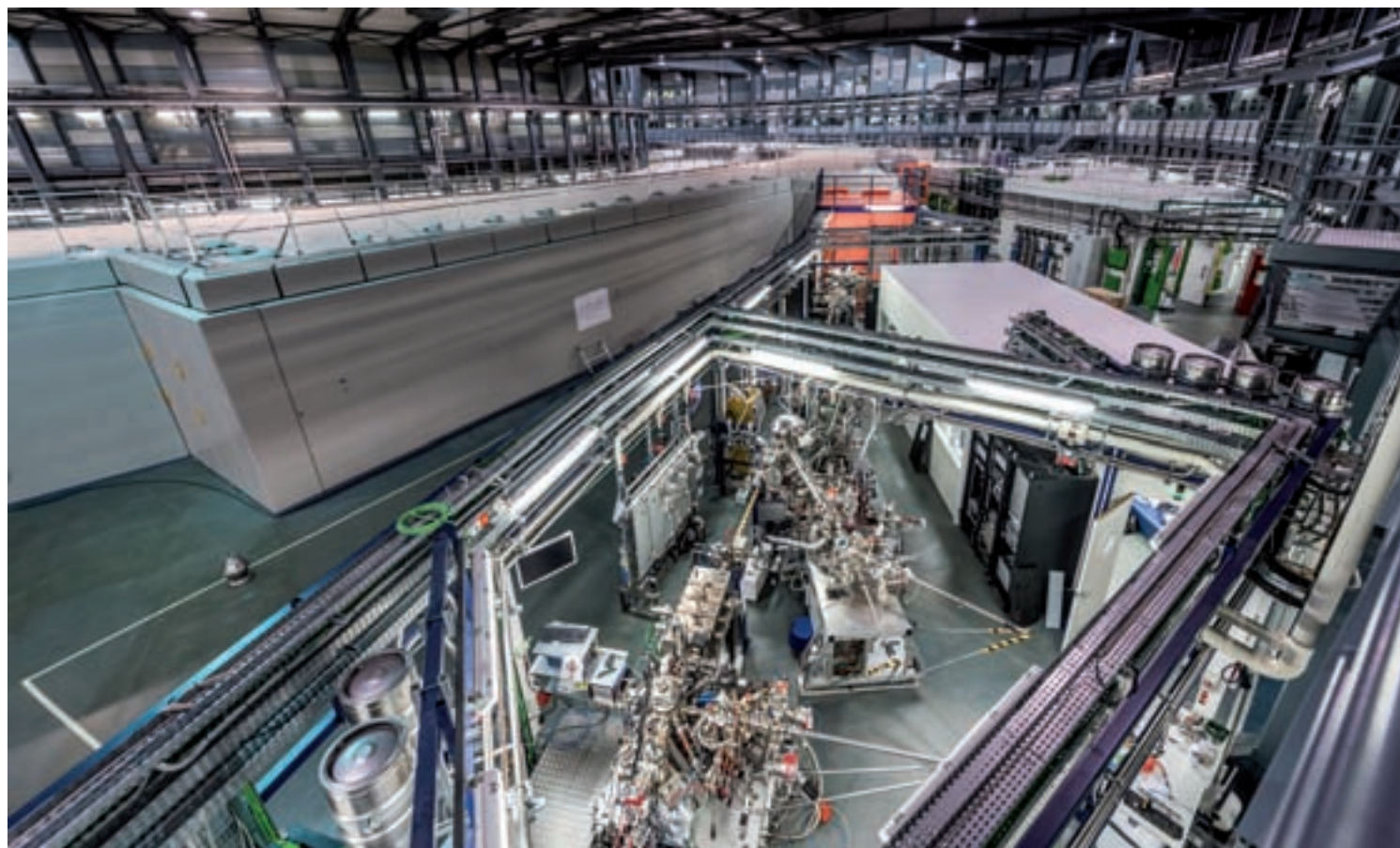
Internacional. Además, está presente en los ecosistemas acuáticos más recónditos. En septiembre de 2020, un estudio realizado en el sincrotrón Alba reveló por primera vez la existencia de microplásticos en el agua dulce del Ártico. En su mayoría, se trataba de fibras de poliéster sintético, un tipo de tereftalato de polietileno (PET), con el que están hechas botellas de bebida y ropa, entre otros.

Aunque, este parece un peligro “indirecto y lejano, acaba afectando de forma directa y cercana a nuestras vidas”, explican en una nota de prensa los autores del estudio, Francisca Fernández-Piñas, de la Universidad Autónoma de Madrid, y Roberto Rosal, de la Universidad de Alcalá. Se refieren al hecho de que estos pequeños fragmentos de menos de cinco milímetros son ingeridos por los animales, y van transmitiéndose de unos a otros a lo largo de la cadena trófica. Hasta llegar a nosotros. Y dentro del organismo van

liberando continuamente compuestos químicos que pueden tener un impacto potencial en la salud. Por ello, animan a “tomar conciencia sobre el reciclaje, la reutilización de los plásticos y el peligro medioambiental, sobre todo de los plásticos de un solo uso”, enfatizan.

Como si la ciencia se hubiera hecho eco de la petición, tan solo un mes más tarde, en octubre de 2020, de nuevo la revista *Nature* publicó en su portada el descubrimiento de una nueva enzima que descompone biológicamente los PET, con una eficacia sin precedentes. Gracias al Alba, investigadores del Toulouse Bio-technology Institute y Carbios, una compañía francesa de química verde que diseña bioplásticos, dieron con la estructura de una depolimerasa capaz de degradar el 90 % de PET en solo 10 horas. Esto supone multiplicar por 100 el rendimiento de procesos estudiados hasta el momento. El resultado son monómeros, que

SERGIO RUIZ



son los ladrillos básicos para crear nuevos envases y textiles, esta vez reciclados.

### La ciencia del arte

Para coger algo de aire ante tanta amenaza, podemos abstraernos con un poco de arte, un campo en el que el sincrotrón también tiene mucho que decir. El grupo de investigación de Materiales Metaestables y Nanoestructurados de la Universidad Politécnica de Cataluña lleva años apostando por la tecnología del

Alba para analizar materiales de interés histórico-artístico. “Necesitábamos la calidad y resolución de los datos obtenidos con su luz para resolver los problemas que teníamos, obviamente en combinación con otras técnicas de análisis microanalíticas”, explica una de sus catedráticas, Trinitat Pradell.

El haz del sincrotrón penetra en la materia —un lienzo, un esmalte de una tinaja de barro, vidrieras...— y desvela la estructura molecular de las capas que la

componen. A veces, esos estratos son muy delgados, de unas decenas de micras de grosor, de diferentes materiales, algunos vítreos con iones metálicos que sirven de colorantes, y otros que se han ido formando con el paso del tiempo. Se desvela así su naturaleza profunda, su origen y los métodos utilizados para su creación. También si hay suciedad y de qué tipo.

Los sucesivos estudios llevados a cabo por Pradell confirmaron que algunas de las manchas presentes en las pinturas murales del siglo XIV de la capilla de San Miguel del Monasterio de Pedralbes de Barcelona se debían a la presencia de hongos. También, desvelaron las técnicas y sustancias con las que se elaboraron los vitrales de las Catedrales de Toledo y Segovia, de los siglos XVI, XVII y XX. Toda esta información facilita las tareas de conservación y restauración.

“Disponer de instalaciones de altas prestaciones es muy importante en

A la izquierda, vista aérea del hall experimental del Sincrotrón Alba, sobre la línea de luz CIRCE. Sobre estas líneas, interior del túnel del acelerador, con el anillo de almacenamiento a la izquierda, y el anillo propulsor a la derecha.



SEBASTIÁN RUIZ

## ¡Que no escape ni un rayo!

El sincrotrón Alba es una instalación de primera categoría porque emite rayos X muy energéticos que pueden provocar cambios químicos en las células de un ser vivo que se exponga a ellos. Por eso, tiene que tener estructuras de contención, sistemas de medición de radiación y protocolos de emergencia.

Los aceleradores están rodeados por dos estructuras de hormigón que suponen un blindaje a la radiación: una encierra el acelerador lineal y otra más grande, denominada túnel Alba, a los dos anillos. Así se consigue que en el resto del edificio el nivel de radiación permita la libre circulación, explica Laura Urteaga, técnico del Área de Evaluación de Instalaciones Radiactivas Industriales del Consejo de Seguridad Nuclear y evaluadora de la instalación.

Para evitar el paso a zonas peligrosas cuando el sincro-

trón está en marcha, hay un sistema de enclavamientos que controla los accesos y los niveles de radiación. De forma que se impide entrar a los recintos de los aceleradores cuando éstos están funcionando, y los detiene si se supera un nivel alto de radiación.

Toda la instalación está supervisada por el Servei de Coordinació d'Activitats Radioactives de la Generalitat de Catalunya, que hace una inspección anual para comprobar que las medidas de contención funcionan; y por el Consejo de Seguridad Nuclear, responsable de autorizar las sucesivas modificaciones de la instalación.

Las inspecciones rutinarias de control se hacen con el sistema funcionando y en parada programada, para analizar dentro y fuera de los búnkeres según Belén Tamayo, del CSN, que también se encarga de evaluar el Alba. Las de licenciamiento suelen preceder a la apertura de una nueva línea de luz.

cualquier campo. En ciencia lo es todavía más, si pretendemos abordar determinados problemas”, señala Pradell. A lo que añade Díaz, que “era un polo científico del que España carecía totalmente: no sólo es la tecnología que adquirimos sino la capacidad de implementarla, que requiere formación de ingenieros y científicos”.

### Nuevas placas solares

En la misma línea argumenta Julian Steele, científico de la Universidad KU Leuven (Bélgica). La valía de una gran infraestructura científica como ésta va más allá de la calidad del haz que genera y de los aparatos de observación de los que dispone. “La disponibilidad y flexibilidad para adaptarse a los imprevistos del Alba, su capacidad de improvisar nuevos experimentos sobre la marcha según los resultados, y la predisposición y experiencia del personal” son, en su opinión, superiores a otros sincrotrones gemelos. Además, en su caso, fueron “claves” para que su artículo se publicara finalmente en la revista Science, el pasado julio.

Steele es el investigador principal de un estudio sobre el llamado silicio del futuro: la perovskita, un material que promete placas solares más baratas, que requieren menos energía para su fabricación y con una eficiencia muy superior al 20 % de las células fotovoltaicas actuales. Tal es su relevancia que el Foro Económico Mundial las incluyó en su lista de las 10 tecnologías emergentes de 2016 y se consideran entre las posibles candidatas al Premio Nobel. El talón de Aquiles es que es inestable cuando está a la intemperie, por lo que sus paneles tienen una vida de unos pocos meses, frente a los 30 años de las convencionales.

El equipo internacional liderado por Steel descubrió una innovadora solución a este problema, “diferente de otros métodos que normalmente implican una alteración química y morfológica del

material”, explica el investigador. La luz del Alba reveló que la perovskita se estabiliza cuando se la fija (con una unión fuerte) al sustrato de cristal que hace de basamento del panel solar, lo que se consigue calentándolos primero a 300 grados centígrados y luego enfriándolos.

Otro elemento al que la ciencia quiere encontrar sustituto es el cobalto, que forma parte de los cátodos de muchas de las baterías de ion-litio que usamos en

y liberarla 10 veces más rápido que las baterías convencionales, lo que ayudaría a los vehículos eléctricos cuando aceleran.

“La luz de sincrotrón ha sido muy útil para seguir la reacción en tiempo real y determinar cómo cambia su estructura”, explica Aleksandr Missiul, investigador postdoctoral del sincrotrón Alba y coautor de la publicación en la que han participado el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, el Centro de Investigación



Estación experimental de la línea de luz CIRCE, dedicada a estudiar las propiedades electrónicas de los materiales y reacciones químicas en catálisis.

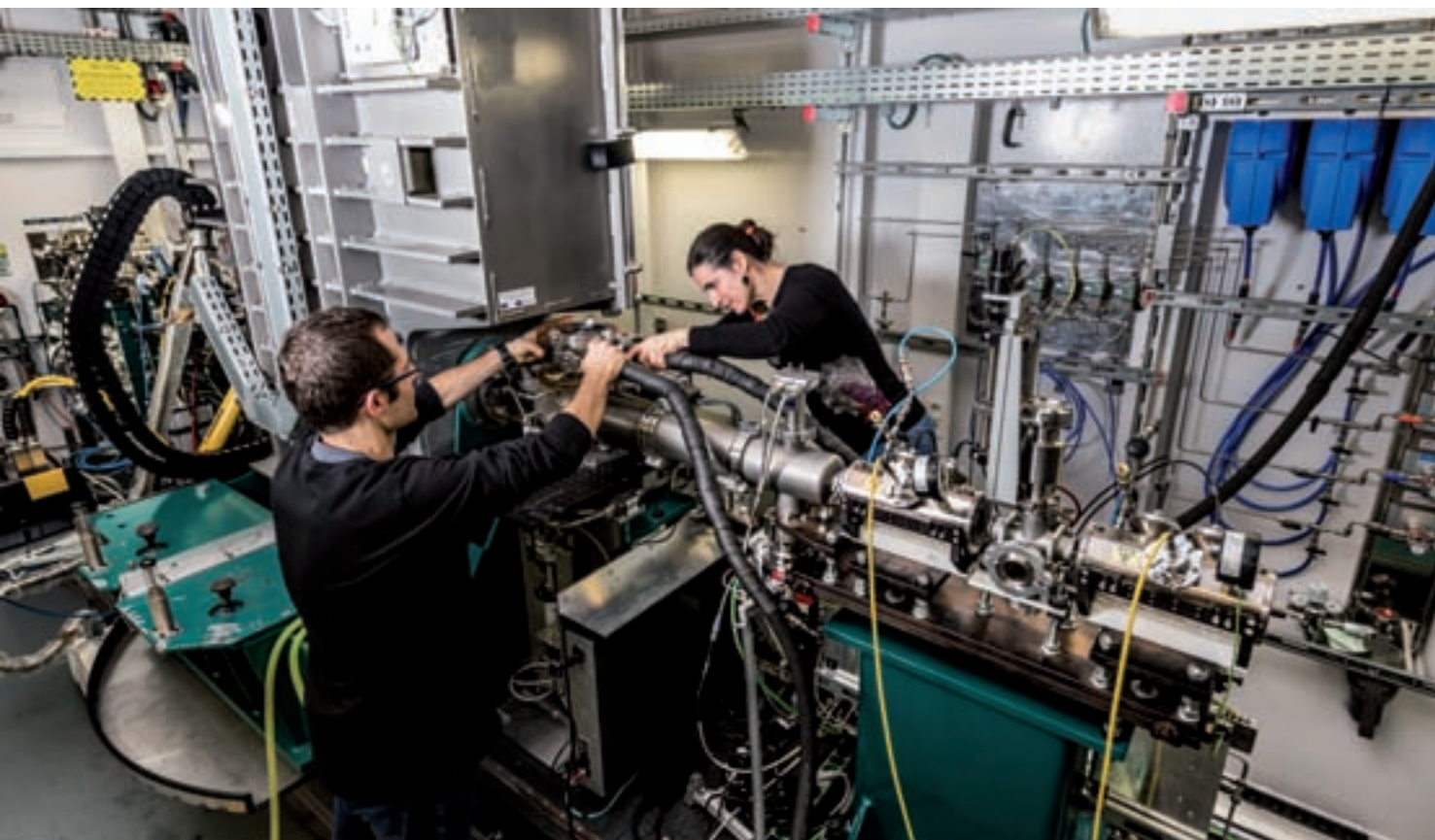
móviles, portátiles y coches, entre otros. Este componente es difícil de obtener, altamente tóxico y la materia prima más cara de estos dispositivos. La dificultad reside en desarrollar cátodos sin cobalto, pero con litio. Cuanto más mejor, porque mayor será su capacidad de almacenamiento.

En 2019, unos experimentos en el Alba contribuyeron a desarrollar una tecnología para sintetizar óxidos laminares ricos en litio. Además, demostraron que los materiales fabricados con este método pueden acumular mucha más energía

Jülich, la Universidad Técnica de Múnich (Alemania), la Universidad de Sichuan (China), la Universidad de Wollongong (Australia) y del sincrotrón DESY (Alemania).

### Alba II en el horizonte

Lejos queda ya el primer gran experimento que se realizó en el Alba, en 2012, con superconductores a los que se les incorporaban nanopartículas de óxidos metálicos para transportar corriente eléctrica de manera más eficiente. Entonces, el Instituto de Ciencia de Materiales de



Interior de la cabina experimental de la línea de luz CLÆSS dedicada a espectroscopias de absorción y emisión de rayos-X.

Barcelona y otros organismos científicos españoles formaban el 80 por ciento de los usuarios del sincrotrón. Ahora, cuatro de cada diez provienen de instituciones de otros países.

En estos diez años, la participación del sector industrial no ha variado mucho, sigue siendo anecdótica: 50 empresas en total. Éstas son las únicas que deben pagar por usar el preciado haz de luz, mientras que los académicos tienen acceso libre siempre que se comprometan a hacer públicos sus resultados. En opinión de Caterina Biscari no se trata de un problema económico —cada hora de sincrotrón cuesta 500 euros—, sino más bien “un problema de que las compañías desconocen la existencia de esta tecnología y cómo utilizarla. Porque las pocas que se acercan, repiten”.

También, hace una década, la instalación apenas recibía un millar de usuarios al año; hoy esa cifra se ha

doblado, “debido a la alta calidad que ha ido demostrando. Ha crecido tanto la demanda que más de la mitad de las solicitudes se quedan fuera por falta de tiempo”, añade.

Quizás las investigaciones desechadas podrían haberse atendido si Alba trabajara al máximo de su potencial. Ahora lo hace a menos de un tercio de su capacidad. Y aunque de las 33 líneas de luz que puede albergar sólo tiene operativas ocho, el sincrotrón produce diariamente fotones para iluminar incluso a las que no existen. “Con más líneas no se desperdiciarían fotones y se sacaría más provecho a la gran inversión que se hizo”, reconoce Biscari. El problema es, como casi siempre, económico: abrir un laboratorio más supone mucho dinero. “De momento, en los próximos tres años, tendremos 13 puertos funcionando; además, seguimos optimizando los desarrollos tecnológicos para

que se puedan hacer más experimentos en menos tiempo”, añade.

La directora del sincrotrón tiene su mirada puesta en 2030. El pasado diciembre comenzaron los trabajos para cambiar la estructura del acelerador y convertirlo en un sincrotrón de cuarta generación que son los que se están construyendo ahora. El Alba II dispondrá de un haz de fotones con una brillantez muy superior y con mayor capacidad de análisis de la materia ahora inaccesibles en términos de resolución, nivel de detección y de compresión de las propiedades químicas y electromagnéticas. Además, tendrá nueve líneas nuevas más y renovará algunas de las ya existentes. “No se trata tanto de más cantidad (de líneas), sino de dar un salto de calidad, necesario para afrontar los retos científicos del futuro, y que siga situando a España en una posición de vanguardia”, concluye. ©

# Concesión y supervisión por el CSN de los procesos de formación de las licencias de operación de centrales nucleares y de la fábrica de combustible nuclear de Juzbado

La supervisión por el Consejo de Seguridad Nuclear de la formación del personal con licencia de operación (PLO) de centrales nucleares (CC.NN.) y de la fábrica de combustible nuclear de Juzbado (FCJ) se articula a lo largo de diversos grandes ejes: la emisión de normativa y guías de seguridad, la concesión de licencias de operación y su renovación periódica, la realización del programa base de inspección, la valoración del impac-

to sobre la formación del PLO de nuevos análisis de seguridad y de la experiencia operativa y el seguimiento de buenas prácticas internacionales. Además de lo anterior cabe destacar el trabajo conjunto del CSN con el sector sobre la mejora de los procesos asociados a las licencias de operación.

■ Texto: **José Ramón Alonso Escós\***, **Benito Gil Montes\*\***, **Enrique Meléndez Asensio\*\*** | CSN ■

**U**na parte esencial del mantenimiento de la seguridad en las CC.NN. descansa en la actuación humana. La adecuada capacidad de los operadores para actuar en operación normal y durante emergencias se logra mediante distintos aspectos: diseño robusto de los sistemas, procedimientos adecuados y validados, ingeniería de factores humanos y técnicas de prevención de error, pero también lógicamente con una correcta formación.

La filosofía adoptada en España proviene, si bien con diferencias, de la implantada en EE UU, donde tras el accidente de TMI, y con la creación de INPO (*Institute of Nuclear Power Operations*), la industria nuclear trató de buscar la excelencia en la formación, a través de procesos sistemáticos de auditoría y acreditación periódica, en los que juega un papel determinante la metodología SAT (*Systematic Approach to Training*),

todo ello dentro de un enfoque de autorregulación, supervisado por el regulador (US-NRC).

Sin embargo, y dado que la industria nuclear no dispone en España de una organización como INPO, el papel del regulador en la supervisión del proceso cobra especial importancia para garantizar la calidad y la completitud del proceso.

## 1. Normativa aplicable

### 1.1. Pirámide normativa

La pirámide normativa española en esta materia tiene en su vértice, por un lado, la Ley 25/1964 de Energía Nuclear, en la que el artículo 37 establece que debe asegurarse la idoneidad del personal que opere las instalaciones nucleares y radiactivas; y, por otro, la Ley 15/1980, de Creación del Consejo de Seguridad Nuclear, que otorga al organismo la función (1):

Conceder y renovar, mediante la realización de las pruebas que el propio Consejo establezca, las licencias de operador y supervisor para instalaciones nucleares o radiactivas, los diplomas de jefe de servicio de protección radiológica y las acreditaciones para dirigir u operar las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico.

Estos preceptos se desarrollaron en el RD 1836/1999 por el que se aprobó el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR) en cuyo Título V se establecen las categorías de licencias en función del tipo de instalación y el proceso básico para obtenerlas y renovarlas. Para las instalaciones nucleares, el RINR establece la existencia de dos tipos de licencia, de supervisor y de operador. La concesión y renovación de licencias es una función del CSN que desarrollan los tribunales de licencias, uno por instalación nuclear, formados por un presidente, tres vocales funcionarios del CSN, uno de los cuales actúa como secretario, y un vocal propuesto por la instalación. Los

\* Subdirector de Ingeniería y presidente de los tribunales de licencia de CC.NN. y de la fábrica de Juzbado, CSN. \*\* Jefe del Área de Organización, Factores humanos y Formación,

CSN. \*\*\* Consejero técnico en la Subdirección de Tecnología Nuclear y secretario de los tribunales de licencia de CC.NN. y de la fábrica de Juzbado, CSN.



Central nuclear Vandellòs II.

tribunales de licencias funcionan como órganos colegiados de la Administración.

Así mismo, el RINR requiere que el titular de la autorización de explotación de una instalación nuclear desarrolle programas de formación continua, incluyendo los del PLO, cuyas líneas básicas deben estar recogidas en los Documentos Oficiales de Explotación (DOE), en concreto en el Reglamento de Funcionamiento.



Portada de la Instrucción IS-11.

El objetivo de estos programas es asegurar que el PLO mantiene el adecuado nivel de conocimientos, capacidades y habilidades para desempeñar satisfactoriamente sus funciones.

Esta normativa básica se desarrolla en la Instrucción IS-11 del CSN, sobre licencias de personal de operación de centrales nucleares, actualmente en revisión 1.

## 1.2. Concesión de licencias

En la IS-11 se describen los requisitos para la obtención de licencias de operación, incluyendo el programa de formación inicial de los aspirantes y la estructura de los exámenes que el CSN realiza para conceder las licencias de operación, así como las materias objeto de examen.

La IS-11 establece también características específicas de las licencias, introduciendo la posibilidad de que las de operador se limiten a un puesto en la sala de control principal (reactor o turbina), o que puedan ampliarse para obtener la capacitación para supervisar las alteraciones del núcleo y el movimiento de combustible, competencia que corresponde inicialmente a las licencias de supervisor.

En la IS-11 se desarrollan también los requisitos mínimos que deben cumplir los programas de formación continua, cíclicos, que deben constar de sesiones lectivas de repaso de los conocimientos generales y específicos, de todos los procedimientos anormales y de emergencia y una actualización de su capacitación operacional mediante la impartición de la experiencia operativa relevante y de las modificaciones habidas en la planta. Estos programas incluyen también un entrenamiento anual en el simulador de alcance total de sala de control (SSC) de la central, que garantice el entrenamiento en todos los escenarios operativos previstos, e incluyendo también las secuencias accidentales que más contribuyen al riesgo, deducidas de sus Análisis Probabilistas de Seguridad. La IS-11 requiere al titular la evaluación del aprovechamiento individual del PLO que incluya la realización de pruebas escritas y prácticas.

Así mismo, la IS-11 requiere al titular que disponga de un proceso sistemático de evaluación de la idoneidad de los programas de formación continua y la re-

alimentación de los mismos con los comentarios aportados por el propio PLO.

En el primer trimestre de cada año se remite al CSN un informe anual sobre la formación continua impartida al PLO en el año anterior, así como la prevista en el año en curso, con los principales criterios, incidencias y resultados.

La guía de seguridad GS-1.1 Cualificaciones de licencias de personal para la obtención y uso de operación de centrales nucleares, cuyo objeto es señalar la formación académica, experiencia y entrenamiento mínimos que el CSN estima aceptables para los aspirantes a licencias de operador

El CSN dispone de procedimientos internos que contemplan los procesos de concesión de la licencia, incluyendo los exámenes correspondientes, tanto para centrales nucleares como para la fábrica de combustible de Juzbado.

### 1.3. Renovación de licencias

Para la renovación de una licencia de operación el titular de la central nuclear debe acreditar tres circunstancias en relación al poseedor de la licencia de operación: 1) que ha permanecido ejerciendo efectivamente y con la debida competencia las misiones específicas

de su licencia, y que se han cumplido las condiciones de actividad, 2) que ha seguido con aprovechamiento su programa de formación continua y 3) que sigue siendo calificado como apto para el puesto de trabajo con licencia y para el trabajo con radiaciones ionizantes (o apto en determinadas

condiciones y en este caso indicándolas) por un servicio de prevención de riesgos laborales.

La función de la renovación de licencias recae sobre el tribunal de licencias de cada instalación, quien decide, de manera colegiada, sobre la renovación. Esta decisión se basa en la verificación de los requisitos que establece la normativa, la cual la realiza el Área de Organización, Factores Humanos y Formación (OFHF), quien analiza la información proporcionada por los titulares, contrastándola, si es necesario, con los registros de que dispone el CSN.

Aunque la distribución anual tiene una gran variabilidad, en media anual de los últimos 10 años el CSN ha concedido unas 23 licencias de PLO de centrales nucleares, y ha renovado del orden de 47 de ellas.

## 2. Formación inicial para la obtención de la licencia

De acuerdo con el RINR y la IS-11, para ser titular de una licencia de operación, debe haberse seguido una formación universitaria de grado, culminada con la obtención del título correspondiente<sup>1</sup>. A partir de esa formación previa, el aspirante a licencia sigue un programa de formación establecido por los departamentos de formación, revisado por el CSN e impartido fundamentalmente por Tecnatom, empresa que proporciona este servicio a todas las centrales nucleares españolas. Esta formación inicial incluye una amplia formación teórica a la que se añade un periodo de prácticas tanto en la propia instalación como en el SSC de la instalación, donde se ejercita el uso de procedimientos y se proporciona una comprensión integrada del comportamiento de la instalación frente a condiciones de fallo o de accidente; además, se incluye la estancia en la propia instalación para observar equipos y actividades realizadas allí, e incluida la sala de control principal (SCP), donde se recibe formación en el desarrollo de las tareas de operación.

El punto final de esta formación es el examen de licencia que realiza el CSN. Los vocales/asesores (V/A) de los tribunales de licencias son los encargados de verificar mediante este examen que la formación teórico-práctica recibida por los aspirantes a licencia es adecuada y que ha sido seguida con aprovechamiento. Los V/A del CSN pertenecen al cuerpo técnico, si bien no existe en la estructura organizativa una unidad con dedicación exclusiva a la preparación



Examen de licencia en el simulador de la central nuclear de Trillo.

o supervisor de centrales nucleares y los requisitos para su renovación. Debe señalarse aquí que las previsiones de esta GS-1.1, cuya edición vigente es de 1986, se han visto superadas en muchos de sus aspectos por los requisitos de la IS-11, por lo que su vigencia es muy limitada y está prevista actualmente su revisión.

No se dispone de una instrucción específica para la definición y el desarrollo de los procesos de formación y cualificación de operadores y supervisores de la fábrica de combustible de Juzbado (FCJ), usándose la IS-11 a título orientativo para esa instalación.

de estas pruebas, por lo que debe compatibilizarse esta tarea con las propias del puesto respectivo de cada V/A. Dentro del programa de formación del CSN, en la actualidad se potencian cursos específicos para V/A. Por su parte, dentro de la estructura organizativa del CSN, el Área OFHF tiene la función de apoyar a los tribunales de licencias en la verificación del cumplimiento de los requisitos, tanto de formación inicial como en la concesión y renovación de las licencias.

Para la preparación de los exámenes, las CC.NN. remiten al CSN, con su-

1) fundamentos científicos y tecnológicos, 2) sistemas y disposición de la central, 3) funcionamiento y operación de la central, 4) normativa y 5) protección radiológica. Además, en función de los casos de la licencia a la que se aspire, también el área temática de alteraciones del núcleo y movimiento de combustible.

- La segunda parte corresponde a un ejercicio práctico en el SSC. En esas sesiones, los aspirantes deben demostrar la capacidad de reconocer y diagnosticar eventos basándose en los instrumentos de la SCP, verificar

escenario para comprobar la capacidad de reconocer con prontitud las condiciones planteadas y los procedimientos y ETF aplicables, así como la interpretación y uso de diagramas y planos de los sistemas de la instalación que se utilizan en su puesto de trabajo en la SCP. Este examen incluye también un recorrido por la instalación, con el objetivo de verificar que el aspirante está familiarizado con la disposición de edificios y equipos, es capaz de interpretar la instrumentación local y conoce, en los aspectos que le afectan, las operaciones



Sala de control de la central nuclear de Cofrentes con turno de operación.

ficiente antelación, el material de formación empleado por los aspirantes, incluyendo documentación de la central: planos, procedimientos, diagramas de instrumentación y control (I&C) o cableado, documentos oficiales de explotación, bases técnicas de los procedimientos y especificaciones técnicas de funcionamiento (ETF), entre otros.

El proceso de los exámenes de licencia consta de tres partes diferenciadas:

- La primera parte es una prueba escrita, que se realiza en las oficinas del CSN<sup>2</sup>, en el que se plantean cuestiones relativas a cinco áreas temáticas:

los automatismos y operar los controles manualmente y demostrar su capacidad de seguimiento de procedimientos en operaciones normales, anormales y de emergencia, actuando como un equipo coordinado. Las competencias a verificar se diferencian según el puesto (de operador o de supervisor) al que se opta. Esta parte no se realiza en el caso de las licencias de la fábrica de combustible de Juzbado.

- La tercera consiste en un ejercicio, también práctico, en la propia instalación; en este caso se plantea un

que realiza el personal auxiliar en operación normal, anormal o emergencia. De nuevo, se diferencia entre los dos tipos de licencia para la valoración.

Para superar cada parte del proceso se requiere un alto nivel de cumplimiento: así, en cada ejercicio es necesario obtener una puntuación del 80 %, con todas las áreas temáticas o competencias de los exámenes prácticos por encima del 70 %.

Una vez superadas satisfactoriamente las tres partes de que consta el examen, el tribunal da el apto técnico, OFHF

verifica el cumplimiento de las restantes condiciones exigidas por la normativa y, finalmente, las licencias son firmadas por el presidente del organismo.

Tras la obtención de la licencia se debe programar un periodo de trabajo a turnos completos en el que los aspirantes se encuentran ya en la SCP ejerciendo la tarea de operador o supervisor, pero en el que esas actuaciones están siendo supervisadas de forma continua por personal con licencia (al menos igual

dos inspectores del área OFHF<sup>3</sup>, empleando una semana de inspección en la planta, e incluyendo en su alcance la formación de todo el personal con funciones relacionadas con la seguridad (esto es, la formación del personal con y sin licencia de operación).

En lo que concierne al PLO los objetivos de estas inspecciones son verificar el proceso de aplicación y mantenimiento del programa de formación y entrenamiento continuo y el proceso

- Las pruebas del titular, escritas y en simulador, para evaluar las competencias del PLO.
- La administración de las pruebas de evaluación al PLO, por parte del titular, con entrevistas al PLO y al personal involucrado en el desarrollo, impartición y evaluación de los programas de formación continua. En esta parte se asiste a una sesión de re-entrenamiento, con evaluación en el SSC, de un equipo de operación.



Sesión de entrenamiento en el simulador de la central nuclear de Ascó.

a la del nuevo miembro del turno). La duración de este periodo es distinta para cada tipo de licencia.

### 3. Formación continua

La supervisión por el CSN de los programas de formación continua del PLO se realiza primordialmente a través de inspecciones periódicas, que forman parte del plan básico de inspección del CSN y se realizan bienalmente a cada central nuclear (PT.IV.208 Formación del personal). Normalmente son realizadas por

de evaluación de las competencias y el cumplimiento de las condiciones de licencia.

Para alcanzar estos objetivos, los principales aspectos que se revisan son:

- El historial de operación de la central, buscando posibles patrones de comportamiento que pudieran denotar deficiencias o áreas de mejora.
- El proceso del titular para el mantenimiento del programa de formación y entrenamiento continuo y su implantación.

- El proceso de recuperación formativa del PLO.
- La conformidad con las condiciones de licencia del PLO.
- La conformidad del SSC con los requisitos aplicables para garantizar la fidelidad física y funcional del mismo.
- Adicionalmente a las líneas de inspección descritas en los párrafos anteriores, se inspecciona el marco estratégico y organizativo del titular que encuadra en su conjunto a

la formación del personal (incluido el PLO).

## 4. Desarrollos recientes

### 4.1. Actividades del CSN

Se ha culminado la publicación de la revisión 1 de la IS-11 (de fecha 30/01/2019), modificando aquellos aspectos que han presentado dificultades en su aplicación y mejorando la estructura de la norma para facilitar su comprensión y cumplimiento. Esta revisión ha clarificado y estructurado los requisitos de los programas de formación de las CC.NN. y ha reformado aspectos de la regulación de los casos de suspensión o pérdida de la licencia, con aten-



Exterior de la fábrica de combustible nuclear de Juzbado.

ción a circunstancias de ausencia prolongada de la Sala de Control. La publicación de esta revisión de la IS-11 estará acompañada de una próxima revisión de la GS-1.1.

Adicionalmente a las inspecciones sistemáticas, el CSN realiza una valoración de nuevos análisis de seguridad e incidencias que pongan de manifiesto necesidades formativas del PLO, tales como los análisis de seguridad requeridos para el cumplimiento de la normativa de PCI, los exámenes de los tribu-

nales de licencias, los sucesos notificados y los hallazgos de inspección. En caso de que se concluya en la necesidad de reforzar la formación en alguno de estos aspectos, se transmite esta conclusión a los titulares.

En el marco de la adaptación del RINR a la Directiva Europea 2014/87/Euratom, está prevista la revisión del Título V para unificar su redacción con la incluida en la IS-11 y mejorar aquellos aspectos que se han revelado poco claros en su aplicación.

### 4.2. Actividades de las CC.NN. y la FCJ

Las buenas prácticas en diferentes centrales nucleares españolas para la mejora de los programas de formación inicial y continua del PLO son otro elemento del que el CSN, como organismo regulador, es consciente y, en la medida que le corresponde, fomenta. Un ejemplo relevante son las actuaciones de algunas centrales nucleares que adoptan estándares internacionales desta-

cados, impulsadas por una adecuada dirección estratégica que aporta los necesarios recursos económicos y humanos para dar un salto cualitativo en la aproximación a la formación del personal de su organización.

Por parte de la fábrica de combustible de Juzbado se ha avanzado en la definición de un nuevo modelo de licencias de operación que debe ser evaluado y aceptado por el CSN antes de su traslado a los documentos oficiales de explotación de la instalación.

### 4.3. Actividades conjuntas CSN/Sector

En un marco colaborativo entre el CSN y el sector nuclear se constituyó en febrero de 2016 el Grupo Mixto CSN-UNESA sobre Licencias de Operación, con participación de todas las centrales nucleares y de Tecnatom. El grupo trata de aunar criterios y dar pautas para mejorar el proceso de licencia, en diversos aspectos, tales como: la documentación necesaria para la preparación de los exámenes, la completitud y calidad del material de formación, la estructura y organización de los exámenes escritos, el mantenimiento de la integridad de los exámenes en los aspectos de confidencialidad, o la organización de los exámenes de simulador y planta, analizando también la influencia y reorientación del SAT en esas materias. Un notable resultado de este trabajo es la reestructuración de las sesiones de examen, de manera que las que corresponden a fundamentos y normativa y protección radiológica se realicen en un momento de la formación que permita verificar que estos conocimientos están correctamente asentados, realizándose el resto de pruebas en un momento posterior. El trabajo del grupo mixto finalizó su actividad principal en noviembre de 2018, si bien se ha mantenido el clima de colaboración hasta la fecha, con numerosas interacciones entre las partes para avanzar en propuestas de unificación de criterios. ©

<sup>1</sup> Norma general que, por motivos históricos, ha admitido excepciones en el puesto de operador de turbina.

<sup>2</sup> Con motivo de las restricciones impuestas por la pandemia por COVID-19 en 2020, de manera extraordinaria, estos exámenes se han llevado a cabo en las propias CC.NN.

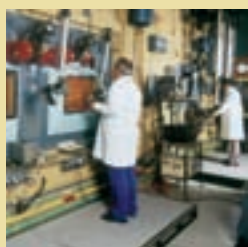
<sup>3</sup> Con el apoyo de miembros de los tribunales de licencias para las sesiones de simulador y con la participación del Área de Ingeniería de Sistemas para la comprobación sexenal de las capacidades y aceptabilidad del SSC.

# Primera intervención ante un incidente con material radiactivo

## Para qué se utilizan las fuentes radiactivas

### Usos médicos

- Diagnóstico
- Tratamiento



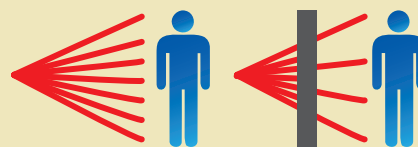
### Usos industriales

- Calibración de equipos
- Gammagrafía
- Control de procesos
- Medida de densidad y humedad

## Principios básicos de protección frente a la irradiación

### Distancia

- La dosis recibida disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia



### Blindaje

- La dosis recibida disminuye exponencialmente con el espesor del blindaje



### Tiempo

- La dosis recibida aumenta linealmente con el tiempo de exposición

## Riesgos

### Irradiación

- No hay contacto con la fuente



### Contaminación

- Puede haber contacto con la fuente (inhalación, ingestión o piel)



## Posibles tipos de señalización

### Trébol



### Contenedor



### Internacional



### Transporte



# Decálogo de actuación ante un incidente con material radiactivo

## 1. Sospecha

- En caso de sospecha de material radiactivo, **actuar como si fuera real**.

## 2. Planificación

- Primero **pensar, planificar y después actuar**. Nunca lo contrario.

## 3. Buscar ayuda especializada

- **Notificar al correspondiente centro de mando** la sospecha de material radiactivo y proporcionar toda la información disponible.
- **Notificar a la Sala de Emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear (Tel.: 91 3460 616. Atención 24 horas / 7 días).**

## 4. Distancia

Alejarse del material sospechoso a una distancia que permita:

- El **control visual del material** y de las **personas** de los alrededores.
- **Mínimo 30 metros**.
- La **dosis disminuye con el cuadrado de la distancia** (a 30 metros es 900 veces inferior).

## 5. Precaución ante una posible contaminación

- Observar la existencia de **desperfectos, derrames líquidos o humedades** que puedan indicar **pérdidas de blindaje** (dosis más altas) o de **dispersión de material** (contaminación radiactiva).
- Situar con el **viento siempre a la espalda**.
- En caso de posibles derrames **acordonar a unos 100 metros en exteriores**.

## 6. Protección del personal

- **No manipular, no abrir, no tocar** el material sospechoso.
- **Prohibido comer, beber y fumar** en las proximidades.

## 7. Protección de la población

- **Evitar que las personas se aproximen** al material sospechoso.
- **Acordonar y controlar el acceso** a unos **100 metros en exteriores y en caso de posibles derrames a unos 200 metros**.

## 8. Registro de información

- Identificar, controlar y registrar la filiación de **todas las personas que hayan podido verse afectadas**.

## 9. Atención heridos

- Es **prioritaria la atención médica**.
- Luego la protección ante la radiación.

## 10. Vigilancia

- **Permanecer en la zona hasta la llegada de apoyo especializado y relevo**.

## R E C O R D A R :

- **1. Tiempo:** el menor posible.
- **2. Distancia:** la mayor posible que sea compatible con el menor impacto social posible y el control visual.
- **3. Blindaje:** disminuye la radiación.

Elvira Romera Gutiérrez (Granada, 1969) se licenció en Ciencias Físicas y se doctoró en Física por la Universidad de Granada, la misma en la que ha desarrollado la mayor parte de su carrera investigadora y docente y en la que es, desde 2016, catedrática de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Ha realizado estancias de investigación en Alemania (Bonn y Tübingen), Hungría (Debrecen) y Argentina (La Plata). Su proyección internacional se completa con numerosas colaboraciones con científicos de diversos centros europeos, americanos y asiáticos. Ha dirigido nueve proyectos de investigación y participado en otros diecinueve. Es autora de más de 100 publicaciones, de las cuales 86 son artículos incluidos en los *Journal Citation Reports* de la *Web of Science*. Sus áreas de investigación incluyen las transiciones de fase topológicas y propiedades

electrónicas en materiales nanoestructurados de baja dimensionalidad, las transiciones de fase cuántica, dinámica de sistemas hadrónicos e interacciones entre bosones y hadrones, entre otros muchos. En su faceta como gestora, ha sido miembro del Consejo Asesor del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI) y responsable de uno de sus grupos; y ha pertenecido al Consejo de Gobierno de la Universidad de Granada, donde también ha ocupado otros cargos. También ha sido miembro de la Junta de Gobierno de la Real Sociedad Española de Física, cuya sección local granadina presidió, y dirigió el Instituto Interuniversitario de Investigación Carlos I de Física Teórica y Computacional desde 2014 hasta su incorporación al Consejo de Seguridad Nuclear, en marzo de 2019, como consejera del organismo.

Entrevista a Elvira Romera Gutiérrez, consejera del CSN

## “La principal fortaleza del Consejo reside en el gran rigor e independencia de sus técnicos”

■ Ignacio Fernández Bayo | Periodista científico ■

Elvira Romera asegura que su propuesta de nombramiento como miembro del Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear le generó una gran ilusión. Reconoce que la experiencia le está resultando muy interesante y abriéndole nuevas perspectivas, diferentes

a las que está acostumbrada a tratar en la complejidad de sus ámbitos de investigación, que reconoce difíciles de explicar a nivel divulgativo. Mujer prudente, durante la entrevista medita las respuestas y evita atribuirse méritos que no le correspon-

dan; por ejemplo, a la hora de hablar de temas en los que sus compañeros del Pleno ejercen la principal responsabilidad.

**PREGUNTA:** ¿Hasta qué punto conocía el CSN antes de que le ofrecieran integrarse en su Pleno?



**RESPUESTA:** Conocía muy poco, la verdad. Ahora lo conozco mucho mejor y después de un año y medio ya voy haciéndome una idea de todo el trabajo que se gestiona, la responsabilidad que supone. Realiza una labor importantísima

y creo que la gente no es consciente de eso, porque es verdad que es un gran desconocido, lo cual es sorprendente dada su importancia a nivel medioambiental, a nivel sanitario y a nivel energético, pero su actividad pasa desapercibida.

**P:** ¿Le ha sorprendido algo al ir conociéndolo?

**R:** La palabra no sería sorprender, me ha resultado y me sigue pareciendo muy interesante.

**P:** Con esa experiencia de año y medio,

*¿cuáles le parece que son las fortalezas del Consejo?*

**R:** Como cosas positivas, en primer lugar, yo destacaría a sus trabajadores. El Consejo está formado por técnicos con un alto nivel de formación que se esfuerzan por hacer un trabajo riguroso, con una gran independencia y hay que destacar la formación permanente que realizan. Esa es su principal fortaleza. Prueba de ello es que, a nivel internacional, tanto en el OIEA como en la NEA, los técnicos del Consejo tienen muy buena reputación. Y esas mismas relaciones internacionales también son otra fortaleza del Consejo. Se trata de una actividad importante, porque permite intercambiar experiencias y fomentar la cultura de seguridad, y España tiene un papel muy activo en esas relaciones. Puedo añadir que en el CSN se respira un buen ambiente de trabajo y que no solo los técnicos realizan una excelente labor; también el personal administrativo y laboral realiza un gran trabajo y contribuye a que el Consejo funcione muy bien.

**P:** *¿Y qué aspectos del Consejo habría que mejorar, qué retos afronta?*

**R:** Siempre hay posibilidades de mejora. Una de ellas es la que ha puesto de manifiesto la misión IRRS-Artemis y que ya se está abordando desde el Pleno, que es hacer un análisis sistemático de competencias para adaptar la formación a las necesidades del CSN. El otro objetivo de mejora es la transformación digital, que es una puesta a punto continua en el uso de las tecnologías, incluyendo la adaptación al teletrabajo, que ha precipitado la pandemia.

**P:** *Esta transformación digital ¿cómo se está llevando a cabo?*

**R:** Hay una comisión encabezada por el presidente del CSN y en la que hay consejeros y técnicos y que se está haciendo en colaboración con una consultora. La idea es mejorar diferentes aspectos. Esto viene motivado principalmente por la

pandemia y por la necesidad derivada del teletrabajo. Está basada en tres principios. La transformación tecnológica, tener en cuenta la evolución de los sistemas y la automatización de operaciones, potenciar la ciberseguridad y ampliar las herramientas de administración electrónica, mirando a la sociedad, ampliar las herramientas que actualmente tenemos. Hay otro principio que es la transformación organizativa, la idea es potenciar los sistemas de gestión basados en datos. Y, por último, hay la transformación cultural, que incluye la captura y desarrollo del talento digital y además una potenciación de todo lo que esté orientado a la ciudadanía y al usuario. Todas las

*“Uno de los retos del CSN es la puesta a punto continua en el uso de las tecnologías”*

aplicaciones que faciliten el intercambio de información.

**P:** *¿Cuándo dice ciudadanía está pensando en la sociedad en general?*

**R:** Sobre todo, pienso en los usuarios, entendiendo no solo a los titulares sino a la gente interesada en saber qué ocurre en el CSN. Hay que distinguir la gente que accede para solicitar algo, como un licenciamiento o un servicio, de la gente que accede para obtener información, que no son exactamente usuarios. La web del Consejo debe facilitar su acceso a ambos.

**P:** *Precisamente, una de las tareas encomendadas al Consejo es acercarse a la sociedad en su conjunto, transmitirles no*

*solo lo que se hace sino tranquilizar a la ciudadanía de que todas estas actividades están bien controladas.*

**R:** Es verdad que cuando hablas a los ciudadanos del Consejo de Seguridad Nuclear no sabe qué actividades se realizan en el CSN. Quizás no hemos sabido transmitirlo todo lo bien que deberíamos, y eso es un área de mejora importante, pero estamos haciendo bastante trabajo ahí.

**P:** *Usted me ha facilitado un listado de las actuaciones del Consejo en las que participa y, si le parece, vamos a repasarlas. Entre ellas se encuentra la mejora del sistema de inspección. ¿Es que se está haciendo mal?*

**R:** No, no. La idea es la siguiente, nosotros cuando llegamos hicimos una reunión de trabajo con la dirección de la casa y uno de los puntos tratados que vimos que era importante, que los propios técnicos de la casa proponían, era la creación de un grupo de trabajo para analizar las posibles mejoras de los procesos de inspección, tanto internamente como en su relación con los titulares. En diciembre del año pasado la Dirección de Seguridad Nuclear nos remitió un informe con los puntos que consideraban tratar como mejoras. En primer lugar, revisar el documento marco del proceso de inspección que se aprobó en 2017; otra cosa relevante es automatizar la elaboración de las actas de inspección, como hace la NRC; también hacer un catálogo de formación para la inspección; y disponer de un carnet de acreditación para los inspectores ante los titulares, cuya creación se publicó en el BOE el 23 de marzo y ya lo tienen. Son esas pequeñas cosas las que se están mejorando.

**P:** *También está implicada en el impulso de nuevos acuerdos de encomienda de funciones con las comunidades autónomas, ya que algunas no lo tienen. ¿Está en camino algún acuerdo nuevo?*

**R:** No todas las comunidades parecen igual de interesadas. Las más interesadas inicialmente fueron las más reivindicativas. El Parlamento nos ha pedido que impulsemos el establecimiento de encomiendas con las comunidades con las que ahora no hay y ese encargo me lo hizo el Pleno. De momento, hemos estado hablando con los diferentes gobiernos regionales sobre la posibilidad que tienen de establecer estos acuerdos. Lo que realmente se encomienda es la inspección y evaluación de las instalaciones de segunda y tercera categoría. Es algo muy acotado y, por ejemplo,

hasta después del verano, pero para este tipo de negociaciones la resolución es más difícil. Hay una situación de cierto bloqueo y en su momento habrá que retomar los temas, pero estamos en una etapa de reflexión. El resultado se verá a más largo plazo. Lo que sí hemos hecho ha sido revisar los criterios, que llevaban mucho tiempo sin revisar. Propusimos en un Pleno, en octubre de 2019, revisarlos, incluyendo la experiencia de los últimos 15 años, porque estos criterios se habían aprobado en 2005 y solo se había introducido una pequeña revisión en 2015

que había que resolver. No tienen que ver con las funciones que asumen ni con materias económicas, sino con el día a día. Por ejemplo, si en los criterios ponía que había que revisar una cosa cada dos meses y se venía revisando cada mes. Son cosas del funcionamiento, pero los inspectores querían tener unos criterios oficiales que se ajustaran a lo que realmente se estaba haciendo.

**P:** ¿En general, el CSN está satisfecho con estos acuerdos?

**R:** Sí. Ha habido alguna discrepancia, algún problema puntual, como que un



Elvira Romera, tercera por la derecha, en una reunión del FORO.

las centrales nucleares no se incluyen. El problema es que conseguir inspectores es complicado porque hay que tener una plantilla, lo que supone un presupuesto, aunque la formación la hace siempre el Consejo. Algunas comunidades lo están valorando, otras se han puesto ya a trabajar en ello y algunas más lo ven a más largo plazo.

**P:** ¿Y hay perspectivas de que se consiga firmar pronto con alguna?

**R:** Con el tema de la pandemia los contactos establecidos se retrasaron

para incluir un tema económico sobre la gestión de los fondos para la encomienda. En esta revisión de criterios se ha tenido en cuenta la experiencia de los últimos 15 años, tanto por parte del CSN como de los encomendados. Y el documento con los cambios se aprobó el 3 de junio de 2020.

**P:** ¿En qué consisten esas modificaciones?

**R:** Son cosas muy técnicas y de funcionamiento interno. Tuvimos reuniones con inspectores de las encomiendas y pusieron de manifiesto algunos problemas

inspector no esté haciendo las tareas adecuadamente, pero eso se trata en las reuniones anuales que se realizan con cada comunidad y se solucionan. Se trata de que las administraciones autonómicas se involucren en estas actividades que a todos nos incumben, y para el CSN tiene la ventaja de no tener que desplazar a sus inspectores por toda España, especialmente a las islas, con el coste de esfuerzo, tiempo y económico que supone.

**P:** Cuando la inspección encuentra un problema ¿es el CSN quien actúa?

**R:** Jurídicamente el CSN es el que tiene la titularidad, aunque haya encomienda, y por tanto es el responsable final de las medidas que haya que tomar.

**P:** *Usted también ha mencionado que está trabajando en el impulso y seguimiento de los planes de emergencia radiológica, también en colaboración con las comunidades autónomas. ¿Qué papel juega el CSN en este aspecto, dado que no es una responsabilidad suya?*

**R:** Según la Directiva Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo radiológico, las comunidades autónomas tienen que establecer estos planes especiales ante emergencias radiológicas. Estos planes los desarrolla y aprueba la autoridad competente de la comunidad autónoma y luego los tiene que homologar Protección Civil a nivel nacional. Además, tienen que tener el visto bueno del Consejo. Lo que se estableció en la Directiva es que el Consejo hiciera una guía para desarrollar esos planes. Además, para facilitar el trabajo, el Consejo ha establecido convenios con las comunidades autónomas para orientar la elaboración de los planes y que cuando los terminen estén ya prácticamente listos para darles el visto bueno. La labor del Consejo aquí es solo la de ayuda. Muchas comunidades lo tienen ya establecido, pero faltaban algunas. Y el Pleno me encomendó impulsar su elaboración y nos pusimos en contacto con esas comunidades y la respuesta ha sido muy positiva. Están ya trabajando en ello, aunque la pandemia ha retrasado su elaboración.

**P:** *Usted preside la Plataforma Nacional de I+D en protección radiológica ¿Cuál es su objetivo?*

**R:** Se trata de una plataforma que está realizando un trabajo muy interesante, ya que pretende fomentar las sinergias y el intercambio de conocimientos entre grupos de investigación que trabajan en protección radiológica,

tanto de entidades públicas como privadas. Es semejante a la plataforma CEIDEN, que tiene una larga trayectoria en el sector nuclear, pero en el ámbito de la protección radiológica. Se creó en 2014 y en 2019 obtuvo el marchio de *plataforma tecnológica* por parte del Ministerio y una subvención y este año hemos vuelto a solicitarla y ha sido concedida de nuevo.

**P:** *¿Quiénes forman parte de la plataforma?*

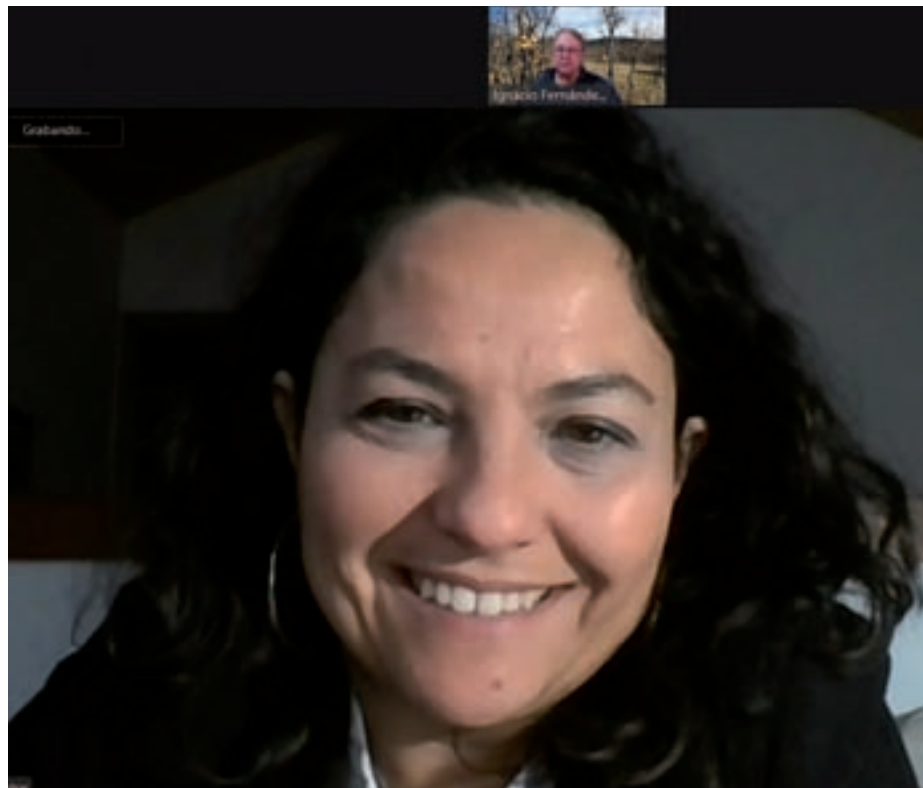


Imagen tomada durante la entrevista por videoconferencia.

**R:** Hay centros de I+D, universidades, hospitales, empresas del sector industrial y energético, suministradores de equipos, empresas de ingeniería... Se ha estructurado en grupos temáticos y en cada uno de ellos hay diferentes actores. Se están desarrollando proyectos de investigación muy interesantes. De momento hay diez grupo de trabajo, que recogen de forma muy completa los diferentes aspectos relacionados con la protección radiológica. En algunos de

ellos participan miembros de los cuerpos de seguridad del Estado, como la guardia civil, y de Protección Civil.

**P:** *¿Siempre ha estado presidida por alguien del CSN?*

**R:** Sí, siempre. No tiene aún personalidad jurídica, sino que cada proyecto lo asume uno de los participantes. Está constituida por una Asamblea General y un Consejo Rector, con un presidente y un secretario general. La gente del Consejo Rector es magnífica, son muy pro-

activos y están haciendo un trabajo excelente. Estoy muy contenta de estar ahí. Además, antes no podía ir a todas las reuniones de los grupos, pero como durante la pandemia se han hecho por videoconferencia he podido participar en casi todas.

**P:** *Otro aspecto relacionado con la investigación es el de las cátedras del CSN, de las que usted coordina una. ¿En qué consiste su labor?*

**R:** Sí, yo llevo la cátedra Juan Manuel

Kindelán. Tal como están planteadas las cátedras actualmente lo que hacemos es dirigir la comisión de coordinación o seguimiento, donde el grupo que ocupa la cátedra nos muestra en qué ha invertido la ayuda. No se trata de controlar o supervisar sino de intercambiar opiniones y conocer la marcha de los proyectos. Para nosotros es importante comprobar que se produce un retorno, que el dinero que invertimos suponga un beneficio en forma de conocimiento.

**P:** *Hasta ahora las cátedras estaban asignadas de forma estable a una Escuela Técnica, pero tengo entendido que en el futuro el Consejo quiere hacer convocatorias competitivas abiertas.*

**R:** Esa es la intención, pero todo esto está costando un poco por las dificultades provocadas por la pandemia. No podemos difundir aún estas convocatorias hasta que no estén aprobadas y encima de la mesa. El modelo de una institución pública, como el Consejo, no es el mismo que el de las empresas privadas que financian cátedras, y por eso creemos que es más adecuado sacarlas a concurso mediante selección competitiva.

**P:** *Dentro del apoyo a la investigación, el Consejo tiene también un Plan de I+D para subvencionar proyectos. ¿Cómo se encuentra actualmente?*

**R:** El Programa de I+D se mantiene, pero es verdad que en los últimos años no se ha podido sacar la convocatoria de las subvenciones por la prórroga de los Presupuestos Generales del Estado, pero espero que en 2021 podamos volver a convocar nuevos proyectos.

**P:** *Usted participa en los comités de enlace con la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA), el Ciemat y la Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares (AMAC). ¿Qué objetivo tienen esos comités?*

**R:** El objetivo es mantener un contacto cercano con instituciones cuya labor es objeto de especial atención por

parte del Consejo y se hacen una o dos reuniones cada año. Las actividades que se realizan son parte de nuestra rutina habitual. Cada consejero lleva algún comité de enlace y participa en otros. Por ejemplo, el del Comité de Energía Nuclear, con las eléctricas, es responsabilidad del consejero Javier Dies, el del Ciemat lo coordina el consejero Francisco Castejón, y lo mismo ocurre con el de Enresa, que lo lleva la consejera Pilar Lucio. Aunque podamos participar en algunos de ellos otros consejeros es de forma secundaria. Con Enusa, que es el que yo coordino, no hay ningún tema problemático actualmente.

**P:** *También coordina el grupo que ha*

*“Hasta ahora el FORO ha desarrollado una docena de proyectos que son de mucha utilidad”*

*elaborado el informe nacional de cumplimiento de la Directiva 2014/87 de Euratom, sobre seguridad de las instalaciones nucleares. ¿En qué consiste ese informe y cómo se elabora?*

**R:** Los estados miembros tienen que presentar un informe sobre la aplicación de esta Directiva explicando la forma en que se realiza su cumplimiento, con la asunción de la responsabilidad y el compromiso respecto a la seguridad nuclear. El informe lo presenta España, pero lo coordina el CSN, con la participación de todas sus unidades técnicas. Para darle un alto contenido institucional siempre ha puesto a un consejero como coordinador. Este informe había que presentarlo el 22

de julio de este año y a pesar de la pandemia se pudo presentar. La verdad es que el trabajo ha sido muy satisfactorio y agradezco la colaboración y contribución de todos los que han participado.

**P:** *También ha participado en el octavo informe nacional de la Convención de Seguridad Nuclear.*

**R:** En este informe el liderazgo es del consejero Javier Dies, pero yo le pedí participar para entrar en ese tema que me parece muy interesante. También se ha terminado y se iba a presentar este año, pero debido a la pandemia se ha pospuesto a 2023. Es un informe que se ha hecho de la forma más rigurosa y minuciosa posible. En su momento habrá que presentarlo, responder las preguntas que suscite entre los representantes de los países firmantes y luego se hace una evaluación del informe.

**P:** *Al principio citaba la importancia de las relaciones internacionales. Dentro de este ámbito usted representa al CSN en el FORO Iberoamericano. ¿Qué importancia atribuye a su actividad?*

**R:** No es el único lugar donde se tratan estas relaciones, ya que el OIEA tiene un Departamento que se ocupa de coordinar a los países iberoamericanos, pero el FORO tiene una creciente relevancia. En él participan 10 países y su función es la de intercambiar experiencias. Funciona mediante proyectos que coordina un comité técnico que preside un representante del CSN. Hasta la fecha se han desarrollado una docena de proyectos y realmente son de mucha utilidad.

**P:** *España va a asumir la presidencia del FORO este 2021. ¿Supone ejercer alguna función relevante?*

**R:** La presidencia es rotatoria y por orden alfabético de ellos miembros. Pasó de Colombia a Cuba y ahora le toca a España. Solo supone que nuestro país se encarga de organizar las reuniones y presidir el Plenario, que es el órgano soberano del FORO



El teletrabajo, una fórmula laboral secundaria hasta hace un año, se ha convertido en una opción mayoritaria para el futuro

# La semilla que germinó con la pandemia

“Cuarentenas, confinamientos, límite de movimientos... una serie de medidas extraordinarias e inimaginables se han sucedido en el último año como consecuencia de la expansión de un virus que ha provocado más de dos millones de muertes por todo el planeta y ha asestado el golpe más duro desde la II Guerra Mundial a las economías de todo el mundo. Pero esta pandemia, como un efecto secundario de sus catastróficas consecuencias, ha permitido que germinen las semillas de una innovadora forma de entender la vida laboral. El teletrabajo se ha alzado como una de las grandes alternativas para que los trabajadores se olviden de la eterna rutina casa-trabajo-casa, y puedan establecer un nuevo paradigma, en el cual deja de ser necesario desplazarse hasta el centro de trabajo. Una opción cuyas consecuencias psicológicas, económicas, sociales y ambientales apenas han empezado a esbozarse.

■ Texto: **Hugo Barcia Cristóbal** | Periodista científico ■



El 68,8 % de los trabajadores afirma sentirse satisfecho con el teletrabajo.

**E**l 14 de marzo de 2020, cuando entró en vigor el estado de alarma decretado por el Gobierno para intentar contener la expansión del coronavirus SARS-CoV-2, se instó a las empresas e instituciones a que adoptasen la modalidad del teletrabajo para todas aquellas actividades que no estuvieran incluidas en el reducido listado de las consideradas esenciales. Casi sin previo aviso, más de dos millones de españoles tuvieron que modificar sus costumbres laborales (o educativas en el caso de los estudiantes) y se unieron a los 950.000 trabajadores que ya desarrollaban su labor a distancia en 2019, según la consultora laboral Randstad.

Medio año después, la aceptación de este método de trabajo ha sido predominantemente positiva, tal y como indica la última encuesta del Centro de Investigaciones Sociológicas de octubre, donde el 68,8 % de los trabajadores afirma sentirse satisfecho o muy satisfecho con esta forma de empleo y tres de cada cuatro añadieron que era una buena opción para continuar trabajando una vez finalizada la pandemia de la covid-19. Sin embargo, estas cifras no muestran la dificultad de implementar una novedosa fórmula laboral que apenas se había desarrollado en España hasta este año. De hecho, de acuerdo con el barómetro, los trabajadores han tenido problemas para conciliar la vida laboral con la familiar, puesto que dos de cada tres afirmaron haberse sentido siempre o a veces “demasiado cansados después de trabajar como para encargarse del cuidado de los hijos o las tareas domésticas”.

Estas dificultades fueron consecuencia de la precipitada implantación del teletrabajo, debido a las circunstancias excepcionales, lo que supuso un cambio radical en todos los sentidos para los trabajadores. Porque lo que habitualmente se habría producido de forma gradual vino acompañado de un confinamiento que impedía salir a la calle (excepto para

las necesidades básicas), cerró las escuelas e institutos y generó una gran incertidumbre en torno a un virus del que apenas se tenía conocimiento. Y la vida laboral tuvo que lidiar con todo ello a la vez.

Esta situación extrema provocó secuelas mentales y físicas en muchos trabajadores, incapaces de sobrellevar tantos cambios. Fruto de ese desgaste mental, los psicólogos jugaron un papel muy importante durante la cuarentena. Aunque ellos también se vieron obligados a adaptarse y ofrecer sus consultas por vía telemática -lo que para muchos profesionales dificultaba aún más su tarea-, acabaron siendo parte fundamental del proceso.

Es el caso de Mercedes Matons, psicóloga clínica, que ha vivido en primera línea el aumento de consultas desde marzo. Cuando se le pregunta acerca del impacto que puede tener el teletrabajo en la gente, no le quedan dudas: “el tema del aislamiento es fundamental, provoca una gran vulnerabilidad psicológicamente hablando”. Entre los trastornos más frecuentes que suele provocar esta situación cita “la ansiedad, el insomnio, la agresividad, bloqueos mentales, crisis de angustias y de llanto o la depresión”.

“Lo más importante es seguir un horario determinado, no estar ocho horas seguidas trabajando y poder parar a tomar un café” aconseja. Además, Matons recomienda utilizar estas pausas para charlar con alguien, aunque sea por teléfono en el caso de quienes viven solos, para evitar la sensación de aislamiento. Otra de las medidas que recomienda tomar es limitar los espacios de la casa, es decir, tener un lugar fijo de trabajo. Hay que evitar teletrabajar desde la propia habitación donde uno duerme o en el comedor, dos espacios que se deben relacionar con actividades que no guarden relación con la actividad profesional. “Esto es esencial para mantener los ciclos circadianos, algo importante para nuestro reloj biológico”, afirma.

Eso sí, Matons cree que el futuro del teletrabajo no tiene nada que ver con lo que se ha vivido en estos meses de pandemia. En situaciones normales, los hijos no pasan las 24 horas del día en casa, por lo que los padres pueden trabajar desde el hogar sin molestias. Por ello, la psicóloga opina que el teletrabajo debería seguir implementándose en el futuro, aunque siempre bajo un formato semipresencial, puesto que “las relaciones



Mercedes Matons, psicóloga clínica.

humanas y la presencialidad son fundamentales. Somos animales gregarios”, sentencia.

### Una oportunidad para la España rural

Una de las posibles ventajas que presenta el teletrabajo, al no requerir que los empleados acudan a las dependencias de sus empresas, es que muchos de ellos pueden trasladarse a sus lugares de origen, o a sus

segundas residencias, normalmente situadas en ambientes naturales alejados de la contaminación y el ruido característicos de las grandes urbes que albergan las sedes de las grandes compañías. Un claro ejemplo de ello es lo que sucedió en ciudades como Madrid durante la primera etapa de la pandemia.

En la capital se vivieron dos tipos de desplazamientos hacia otras ciudades o pueblos. Por un lado, el de las personas

que trabajaban y residían en Madrid, pero no eran originarias de la capital, que se marcharon a teletrabajar a sus otras residencias. Esta situación se propagó principalmente entre los jóvenes, que evitaban así los elevados gastos que supone habitar en una gran ciudad. Por otro lado, se encontraban los trabajadores de mayor edad y con un poder adquisitivo superior, que les permite ostentar una segunda residencia en zonas más tranqui-

las como la montaña o la playa. En este segundo caso, la decisión de alejarse de la ciudad no era tanto económica, como en el caso de los jóvenes, sino más bien de confort. Por lo general, las segundas viviendas constan de más espacio, tanto en el interior del inmueble como de zonas verdes, que los pisos de las ciudades, lo que durante el confinamiento garantizaba una mayor libertad de movimiento, aunque siempre limitada.

## La capacidad de adaptación del CSN

Como tantas otras instituciones, el pasado 13 de marzo el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) decidió suspender temporalmente las actividades presenciales en su sede e implantar el teletrabajo como forma principal de que sus empleados realizaran sus tareas habituales. Tan solo una pequeña parte del personal, la que se consideró imprescindible para garantizar el funcionamiento de la organización, tuvo que continuar desplazándose hasta las oficinas del Consejo. Más del 80 % del personal comenzó a trabajar desde sus hogares, una cifra que apenas ha variado en la actualidad, ya que se encuentran teletrabajando 344 empleados, lo que supone “un 81 % del total de la plantilla”, según Jorge Ciria, subdirector de Personal y Administración.

La urgencia y la falta de experiencia de semejantes circunstancias hicieron que la adaptación al cambio no estuviera exenta de complicaciones, que progresivamente se pudieron sortear. Uno de los primeros problemas a solventar, que exigió una respuesta inmediata es el que tuvo que afrontar la Subdirección de Tecnologías de la Información: el reparto de ordenadores al personal que carecía de ellos y habilitar los sistemas telemáticos para que todos los empleados en teletrabajo pudiesen conectarse a los sistemas informáticos del Consejo.

Su subdirector, Manuel Malavé, explica que los primeros días carecían de ordenadores portátiles suficientes para entregar a todos los trabajadores y que “la situación se desbordó rápidamente”, lo que llevó, dice, “a que muchos empleados tuvieran que emplear sus propios ordenadores personales para trabajar en remoto”. Sin embargo, según dice, no pasó demasiado tiempo hasta que pudieron adquirir nuevos equipos, con resultado “muy favorable”. A la entrega de estos dispositivos hubo que sumarle una campaña de concienciación en ciberseguridad que facilitaba a los trabajadores los consejos y advertencias necesarias para evitar posibles amenazas en la red del CSN, puesto que tal y como Malavé indica, “el eslabón más débil de la cadena es el factor humano y sobre él no dejamos de insistir en que debe aplicar siempre la cultura de seguridad necesaria”. Para el responsable, la clave que les ayudó a afrontar esta situación fue la anticipación, ya que la opción del teletrabajo “ya estaba prevista” y la situación de la Covid-19 no hizo “más que acelerar el proceso”, concluye.

Otro de los principales escollos a sortear por los trabajadores fue el de la comunicación, y para ello contaron con una herramienta esencial que les permitió organizar videoconferencias y seminarios y mantener las reuniones que ya

Precisamente es el caso de las personas que ponían rumbo a sus segundas residencias sobre el que sitúa el foco Luis Antonio Sáez, profesor titular de economía de la Universidad de Zaragoza y especialista en demografía rural. En su opinión, “es muy poca la gente que ha quemado por completo sus naves en el mundo urbano”, e indica que la dinámica que más se ha extendido “es la de aquellos que han aprovechado su segunda residencia” para teletrabajar durante el confinamiento. Esto es consecuencia, según Sáez, de que la pandemia ha ayudado a “acelerar el proceso para bastantes personas de que lo que parecía que era una vivienda suplente o secundaria puede ser protagonista”.

Eso sí, también afirma que es necesaria una importante inversión para atraer a las parejas y familias de nuevo



Luis Antonio Sáenz, profesor de Economía de la Universidad de Zaragoza.

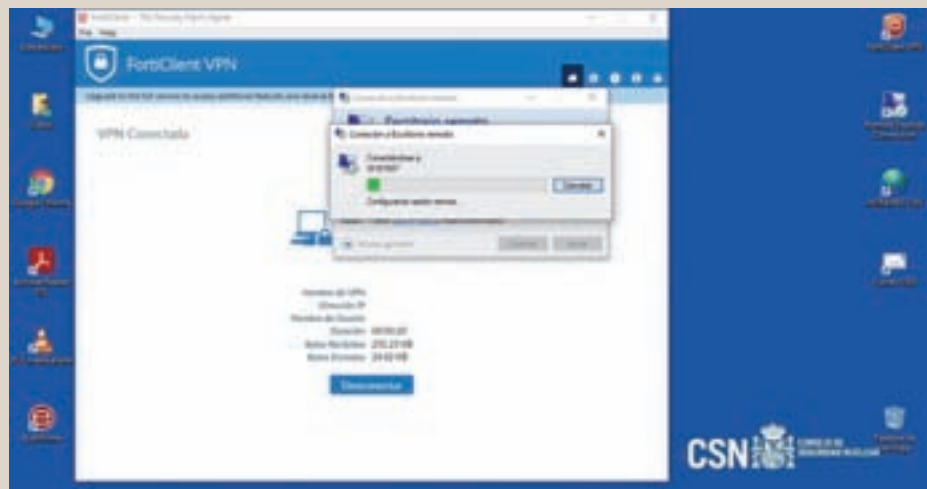
estaban previstas. Para ello, el Consejo cuenta con la plataforma TIXEO. Los datos de utilización permiten hacerse una idea de la relevancia que su uso ha tenido. Desde los albores del estado de alarma, en marzo, se han celebrado miles de reuniones telemáticas con un número medio de asistentes de 3,48 y una duración media de 43 minutos por sesión. El récord de asistentes a una misma reunión ha sido de 64.

Gracias a este y otros programas que más tarde se fueron empleando en el CSN, fue posible mantener la agenda de reuniones de ámbito supranacional. Según dice Isabel Villanueva Delgado, jefa del Gabinete de la Secretaría General, “a pe-

sar de que en un principio las organizaciones internacionales se resistían a llevar a cabo sus actividades en modo virtual, y trataban de posponer las fechas de reunión hasta finales del año 2020, el resultado ha sido un éxito”. También resalta que la figura del *webinar* ha resultado ser una de las más adecuadas ante la situación creada: “Se ha observado que es un excelente sistema para mantener las reuniones internacionales y si bien hay una parte de socialización que es insustituible, el intercambio de información, y el objetivo principal de las reuniones está ampliamente cubierto por los sistemas virtuales”. También ha identificado una franja horaria óptima para

que puedan participar personas de todas las regiones del planeta: la comprendida entre las 11:00 horas y 15:00 h, hora española peninsular.

Otras ventajas que presentan las reuniones internacionales a distancia según Villanueva, es el proceso de la democratización de la participación, puesto que el número de participantes en ellas es superior al que había antes de la pandemia ya que “no es necesario realizar gastos asociados a un viaje y estancia, la participación en



Pantalla de acceso al CSN para los empleados que están teletrabajando.

a las zonas rurales y poder retenerlas. “Lo que se requiere es más imaginación que presupuesto, más que subvenciones hay que generar nuevas plataformas” dice, y menciona varios ejemplos que serían beneficiosos para esa repoblación, como levantar escuelas, mejorar la red de transporte, crear clubes de actividades para los niños, o promover el uso lúdico del campo, por ejemplo, abriendo senderos que pueda atraer a los más interesados en la materia. “Hay algunos pueblos que solo hablan de la banda ancha y creo que deberían mirar también por la infraestructura social”, concluye.

De cara al futuro, Sáez cree que una parte considerable de la gente que optó por marcharse a estas zonas menos habitadas volverán a las grandes ciudades. Sin

embargo, no duda de que esta situación ha generado “un impulso” para que la gente vea lo sencillo que sería trasladarse a estos lugares de forma permanente.

Otra de las consecuencias positivas que tendría la adopción del teletrabajo y la marcha a medios rurales sería la reducción de la contaminación y de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. De hecho, implantar el trabajo a distancia dos días a la semana disminuiría dichas emisiones hasta en tres millones de toneladas anuales, según cálculos realizados por la Fundación Másfamilia. Este descenso sería consecuencia, principalmente, de la disminución de los desplazamientos, que además permitiría rebajar el número de víctimas en accidentes de tráfico, una cifra que en 2019 en España se cerró en 1.098 personas

fallecidas y que parece ser que en 2020 no superará el millar de defunciones.

### Una nueva ley del teletrabajo

La gran pregunta que cabe realizarse ahora es: ¿qué futuro tiene el teletrabajo? Porque lo que ha quedado claro es que esta medida excepcional, que se implementó de forma precipitada y con muchas incógnitas acerca de su efectividad, tanto por parte de empleadores como de empleados, ha terminado por modificar nuestra idea de jornada laboral perfecta. No solo a nivel personal, para que los trabajadores realicen sus tareas desde el hogar de forma más relajada, sino también a nivel de eficiencia. El objetivo que el teletrabajo pretende lograr con su progresiva implantación es que las empresas sigan siendo igual de competitivas y que sus empleados no se vean

## Gestión del CSN entre marzo y octubre de 2020

|                                                                                          |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Videoconferencias realizadas:                                                            | Más de 4.600 |
| % personal del CSN teletrabajando                                                        | 81 %         |
| Reuniones con reguladores internacionales                                                | 50           |
| Licencias de personal y homologaciones de cursos                                         | 2.125        |
| Informes aprobados sobre instalaciones radiactivas                                       | 120          |
| Informes aprobados sobre instalaciones nucleares                                         | 30           |
| Licencias de operación de instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible | 30           |
| Solicitudes dictaminadas                                                                 | 2.356        |
| Actualizaciones de la web                                                                | 401          |
| Publicaciones en redes sociales                                                          | 400          |
| Buzón de comunicaciones                                                                  | Más de 700   |

actividades formativas, conferencias...”, dice. Hoy en día, el proceso es mucho más simple y se limita a realizar una inscripción o registro y unirse en el momento que se desarrolla el evento.

¿Y qué hay de las inspecciones de campo? ¿Cómo se pudieron desarrollar de manera eficaz a pesar de esta nueva situación? La respuesta la proporciona Rafael Mendilibar, inspector residente, que afirma que en abril “se siguió manteniendo en algunas centrales una visita a la semana” y que fue a partir de mayo cuando “la presencia fue aumentan-

do paulatinamente”. De hecho, afirma que actualmente “se mantiene presencia diaria” aunque tanto el número de miembros de la inspección como el tiempo de reconocimiento se han reducido.

A pesar de esta breve pausa, la actividad del CSN nunca se paralizó por completo. Así lo confirmó el presidente del Consejo, Josep Maria Serena i Sender, durante la segunda reunión anual de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA, por sus siglas en inglés), que

tuvo lugar el 22 de septiembre. Según explicó, durante el estado de alarma, se aprobaron 81 informes sobre instalaciones radiactivas, otros 19 sobre instalaciones nucleares, se otorgaron 438 licencias de personal y homologaciones de cursos y se atendieron más de 400 consultas. Un balance que demuestra que el teletrabajo no tiene por qué contemplarse tan solo como una medida excepcional, surgida a raíz de la pandemia de covid-19, sino que habrá que valorar la extensión de su uso en el futuro; por ejemplo, permitiendo que el personal alterne jornadas laborales en la sede con días de trabajo telemático.

obligados a desplazarse todos los días de la semana a la oficina, aliviando parte de su carga mental.

Para los trabajadores, la respuesta es clara. Según la última encuesta realizada por la Cámara de Comercio en junio de 2020, el 84 % de los españoles quería teletrabajar dos o tres días a la semana, y esta cifra aumentaba entre aquellos que creían que sus tareas podían realizarse completamente desde el hogar. En este último grupo, la opción favorita era la de trabajar a distancia hasta tres o cuatro días a la semana. Entre los principales atractivos de adoptar esta nueva modalidad de trabajo, un 62 % de encuestados lo preferían porque reducía el tiempo de desplazamiento, y un 59 % afirmaba que les ayudaba a ahorrar en gastos personales como transporte, ropa o alimentación. Todo eso a pesar de los aspectos



Trabajar desde casa permite disfrutar de una mayor comodidad.



Técnicos del CSN y de Enresa durante una reunión de trabajo realizada por videoconferencia.

Ese mismo balance positivo es compartido por varios miembros del personal. Es el caso de María José López, jefa de Área de Sistema Eléctricos e Instrumentación y Control, quien cree que sería buena idea mantener parcialmente el teletrabajo a pesar de que “no es la forma ideal de trabajar ni de comuni-

carse”. Por esa razón, aboga por buscar una manera de alternarlo con el presencial. Manuel Malavé también lo ve factible, “siempre y cuando las condiciones de seguridad cibernéticas y de estructura de la red estén garantizadas” e incluso Rafael Mendilibar, quien vio paralizadas en abril sus inspecciones personales, saca el lado bueno del teletrabajo: “las videoconferencias son beneficiosas cuando se hacen las reuniones con el titular, sobre todo cuando se hacen fuera de horario laboral y no hace falta desplazarse a la central”. Para todos ellos, Jorge Ciria tiene una buena noticia: “El Consejo está convencido que el teletrabajo ha venido para quedarse, y se está trabajando en un protocolo que lo regule de manera permanente, una vez que haya finalizado esta situación tan peculiar”.

negativos que ha conllevado, puesto que hasta un 50 % apuntaba a la falta de contacto social como el principal problema, seguido de la dificultad para separar el horario laboral y personal (un 44 %), la sobrecarga de trabajo (37 %) y la asunción de costes que debería cubrir la empresa (33 %).

A corto plazo, el teletrabajo ya es una realidad, y así lo confirma desde septiembre el Decreto Ley 28/2020 que constituye la norma que regula el teletrabajo desde el 13 de octubre, fecha de su entrada en vigor. De acuerdo con esta norma, el trabajo a distancia debe ser siempre voluntario para el trabajador y el empleador; es decir, debe ser fruto de un consenso entre ambas partes. Sin embargo, esta decisión es reversible, por lo que el empleador o el trabajador pueden escoger poner fin a esta fórmula

en cualquier momento para retomar el trabajo presencial. Eso sí, esta norma no se aplica al teletrabajo que surgió como consecuencia de la covid-19, y tampoco se aplicará a quienes teletrabajen de forma esporádica. Tan solo podrán recurrir a ella aquellas personas que trabajen a distancia como mínimo un 30 % de su jornada en un periodo de cómputo de 3 meses. La mala noticia de este decreto ley es que no entrará en vigor hasta que no concluyan los convenios colectivos actuales de las empresas que ya tengan regulación del teletrabajo, lo que podría requerir de hasta un periodo de tres años.

### Faltan medios e infraestructuras

Sin embargo, esta ley no es suficiente para María José Domínguez, economista y docente en la Universidad de Santiago

de Compostela. En su opinión, la economía española no estaba preparada para la aplicación tan temprana del teletrabajo, a diferencia de otros países, y eso se debe a la “falta de medios y de infraestructuras en las empresas”.

“Actualmente solo unas pocas multinacionales en España, que eran las que ya habían comenzado a aplicar el teletrabajo, estaban listas”, afirma, y añade que el trabajo a distancia que se efectuó durante la pandemia no puede ser considerado como teletrabajo. “Eso no fue teletrabajar, los niños estaban en casa y requerían atención. No se podía estar a todo a la vez”, dice. También fue negativo para el bolsillo de los trabajadores, quienes tuvieron que hacerse cargo de todos los gastos generados por la nueva actividad. Por suerte para ellos, la nueva ley tiene en cuenta esta circunstancia y obliga a las empresas a hacerse responsable de proveer los medios.

Además del ahorro de estos costes directos, Domínguez asegura que las empresas también ganaron en competitividad, puesto que a raíz de la pandemia “aumentó mucho la productividad de los trabajadores”. Así lo confirma un informe de CaixaBank Research, que estima que la adopción del teletrabajo en España podría aumentar esa productividad entre un 1,4 % y un 6,2 %. Aunque, como menciona la economista, estos buenos resultados se lograron “a costa de que realmente no había ningún tipo de control sobre ese teletrabajo”. Precisamente ser capaces de gestionar el horario de los trabajadores es el gran objetivo que la economista señala para que esta nueva modalidad se implante en la economía española de manera efectiva, porque tanto las empresas “que comprobaron que efectivamente se podía aplicar el teletrabajo como norma general” como los empleados “que vieron que era maravilloso” están de acuerdo en una cosa: el teletrabajo ha llegado para quedarse. ©

# El futuro de la impresión 3D es ya el presente

La tecnología de impresión en tres dimensiones o 3D lleva años integrada en el capítulo de las tecnologías revolucionarias con las que se dibuja el futuro, pero no acababa de despegar fuera de unas pocas aplicaciones de laboratorio o de interés muy específico. Ahora, la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2 le ha proporcionado un empujón que ha puesto de manifiesto su relevancia y su futura inserción en nuestra vida cotidiana. En este año en el que la salud ha sido la principal preocupación de gobernantes y gobernados, ha jugado un papel protagonista en diferentes aspectos y aplicaciones relacionadas con la medicina. Más allá incluso de este ámbito, la impresión 3D se ha abierto camino también en el sofisticado mundo de los reactores nucleares.

■ Texto: **Belén Tobalina** | Periodista científica, redactora de La Razón ■



Mascarilla para sanitarios desarrollada por el CSIC e impresa en 3D.

La crisis sanitaria por la covid-19 ha impulsado en España el uso de la impresión 3D. Había tanta falta de material sanitario que un grupo de investigadores del CSIC, junto con varios hospitales y empresas, se pusieron a trabajar mano a mano. “La idea surgió de forma espontánea. Nos reunimos el comité gestor de la Plataforma FAB3D para ver qué podíamos hacer. Creamos un grupo de trabajo contando con distintos centros de investigación del CSIC y fabricantes para producir pantallas protectoras para los sanitarios y luego los hospitales nos llamaron para pedirnos otros productos”, recuerda Juan Rodríguez, del Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC). Había que ganar tiempo. Y “la impresión 3D nos permitió atender unas necesidades en una situación en la que no había productos. El repunte de producción fue brutal en los meses más críticos de la pandemia” convirtiéndose así en un importante aliado, “cuando hay una ruptura de stock”.

Diseñaron válvulas para respiradores, torundas para PCR y pantallas de protección facial. En concreto, fabricaron “1.400 diademas para las pantallas” partiendo del diseño de Domotek. En la actualidad, ya son ocho hospitales con este tipo de dispositivos validado, aunque su uso estuvo limitado a la ruptura de stock. En el caso de los hisopos, cuatro hospitales están colaborando con el proyecto HISOPOC, financiado por el CSIC: el Hospital de Valdecilla (Santander), el de Biocruces (Bilbao), La Paz (Madrid) y el de Paraplégicos de Toledo. La idea partió de Domotek, que se hizo eco de que en EE UU los empezaban a fabricar así.

A nivel nacional, el hospital virtual de Valdecilla ha sido pionero. “Han fabricado más de 60.000 hisopos en 3D. Esta ha sido básicamente su única fuente de bastoncillos. Los otros tres no llegaron a fabricar, pero estamos validando nuestro modelo con la idea de poder comprar

impresoras 3D para cada uno de estos hospitales con el fin de que puedan autoabastecerse de este producto, ya que en las condiciones actuales sale más rentable imprimirlo en 3D". También hicieron conectores para equipos de protección, el sistema basado en máscaras de buceo integrales de Decathlon ante la falta de equipo de protección certificado. "Hicimos entre 150 y 200 unidades por resina y FDM", es decir modelado por deposición fundida, una técnica con la cual para imprimir la pieza se utiliza una bobina de filamento, a solicitud del Gregorio Marañón.

En cuanto a los conectores para soporte respiratorio de los pacientes, "mandamos entre 40 y 50 kits al Gregorio Marañón y entre 35 y 40 al Clínico, de los modelos Charlotte y Dave. También participamos en la fabricación de más de 20 kits de conectores hechos con resina biocombustible del diseño del Hospital Infanta Leonor", afirma. Todo ello gracias a que "no hubo problemas para conseguir filamento ni resina. Hubo empresas que

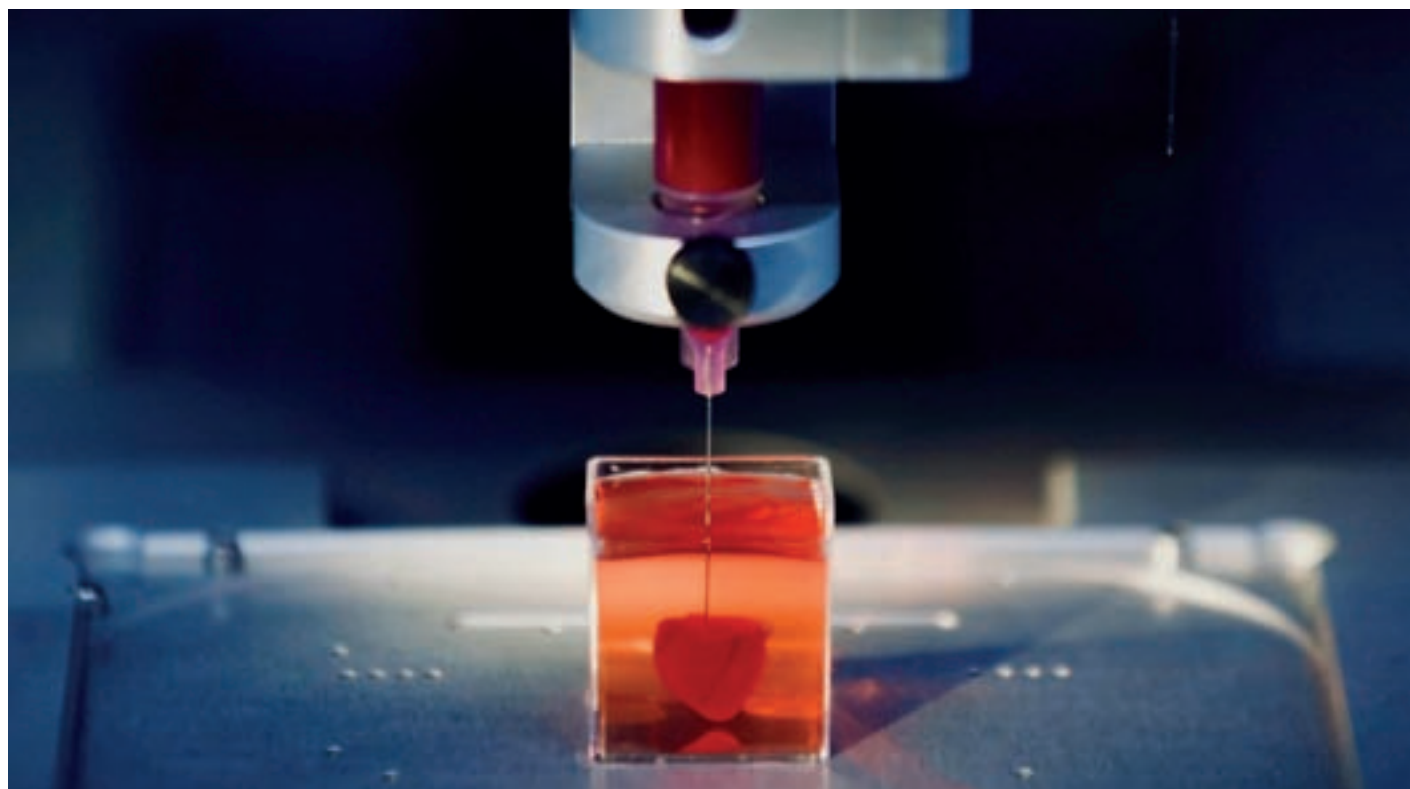
nos regalaban filamento a cambio de que les retornáramos las piezas impresas para donarlas a hospitales". No fueron las únicas donaciones. A ellas hay que sumar las de miles de ciudadanos anónimos que quisieron poner su granito de arena y los investigadores lo han devuelto a la sociedad al compartir todo el conocimiento aprendido sobre la impresión 3D de material sanitario en la web 3D4emergency, donde se pueden ver los modelos fabricados y validados, diseños y ficheros de impresión.

"La covid ha marcado un antes y un después en la impresión 3D. Bastantes hospitales verán esta tecnología como una herramienta esencial a incorporar en sus centros para poder fabricar a nivel interno", estima el investigador, que ve difícil que en un futuro ambas tecnologías lleguen a competir, aunque "ya hay productos impresos en 3D con precios competitivos, como las torundas, que al ser tan pequeñas se producen en muy poco tiempo: 1.000 diarias con una

máquina, de modo que los hospitales podrían autoabastecerse de torundas con una máquina de unos 6.000 euros". En el caso de las pantallas, "no merece la pena. Tardamos siete horas en hacer tres coronas". Le preguntamos si podrían producirse mascarillas: "Quirúrgicas hoy no. Pero hay de plástico flexible impresas en 3D que cuentan con una apertura para colocar el filtro, aunque se tardan hasta 11 horas para fabricar una sola mascarilla".

### Corazones impresos

En muchos ámbitos se están dando pasos de gigante en fabricación aditiva. De hecho, aproximadamente un año antes de que la covid-19 cambiara nuestras vidas, investigadores de la Universidad de Tel Aviv, en Israel, crearon el primer minicorazón impreso en 3D que palpita, utilizando para ello tejido humano de un paciente, según publicó la revista Advanced Science. Nadav Noor, del Laboratorio de Ingeniería de Tejidos y Medicina Regenerativa de dicha universidad y primer



Proceso de impresión de un corazón artificial realizado en la Universidad de Tel Aviv.

autor del estudio, explica que para fabricar el corazón impreso en 3D “tomamos una pequeña muestra de tejido durante una biopsia. En concreto de epiplón, que es el tejido adiposo que rodea el abdomen y que puede obtenerse mediante un procedimiento mínimamente invasivo. Después, separamos las células y el material circundante. Mientras que las células se manipulan genéticamente para que sean células del corazón o las que forman vasos sanguíneos, el material restante se procesa para formar un gel. Mezclamos los dos y obtenemos la biotinta. Podemos formar muchos tipos de bioenlaces así. En mi investigación usamos uno para el tejido cardíaco y biotinta para los vasos sanguíneos”.

“Después —prosigue— los introducimos en la impresora junto con el modelo 3D a imprimir (basado en una tomografía computarizada o resonancia magnética) e imprimimos estos tejidos”. El tiempo varía: “Puede llevar unos minutos imprimir parches de corazón y unas pocas horas para un corazón pequeño a escala (del tamaño del corazón de una rata)”. A continuación, “incubamos los tejidos hasta que las células se organizan y los tejidos maduran. Después de 4-7 días, los parches cardíacos comenzaron a contraerse espontáneamente, por lo que, potencialmente, estos tejidos podrían trasplantarse en el órgano defectuoso para permitir que el órgano recupere su función”. Y una ventaja esencial: “Dado que los tejidos proceden del propio paciente, no serán rechazados por su sistema inmune”. “Además, imprimimos corazones humanos de unos 3 cm, con la estructura anatómica básica y los principales vasos sanguíneos”.

El dilema es cómo hacer que funcione como un órgano real. “El principal desafío que debemos superar es el cultivo y la maduración a largo plazo de los tejidos y órganos. Este paso es crucial para obtener el comportamiento fisiológico de las

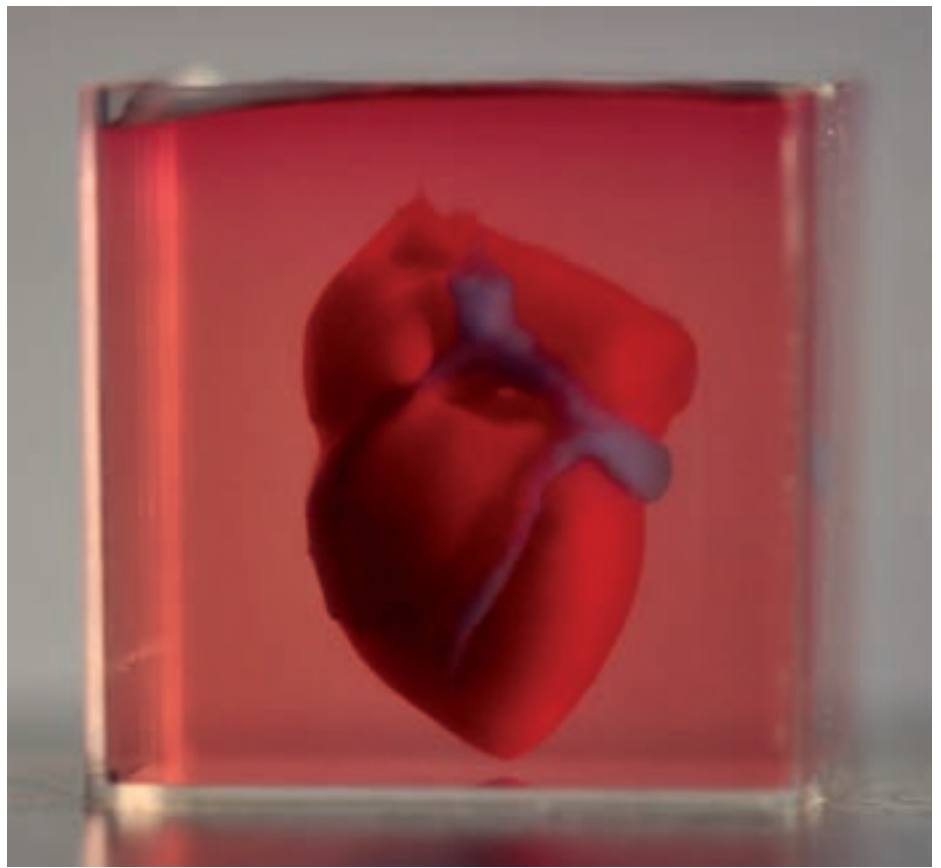


Image del primer minicorazón impreso en 3D que palpita, publicado en *Advanced Sciences*.

estructuras diseñadas (la capacidad de los corazones para contraerse sincrónicamente y bombear sangre). Estamos usando un biorreactor que le dará al corazón impreso las condiciones adecuadas para la maduración: temperatura, oxígeno, presión de flujo, etc. Ahora estamos en esta etapa. Después de un tiempo, las células comenzarán a comunicarse entre sí y a tener capacidad de bombeo”. Resulta prometedor, tanto que surge la pregunta de cuándo podría ser una realidad práctica. “No podemos predecir el tiempo que requerirá llevar estos desarrollos a la aplicación clínica y sería irresponsable hacerlo. Esperamos que el campo de la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa se desarrolle rápidamente, pero debemos ser pacientes, aún queda mucho trabajo por hacer. Ahora estamos investigando el comportamiento fisiológico de los tejidos diseñados. Si obtenemos resultados positivos, pasaremos a los

experimentos en modelos animales”. De lograrse, supondría una revolución en el campo de los trasplantes y en el de las enfermedades cardiovasculares que son, según la OMS, la principal causa de defunción a nivel mundial: en 2012 murieron 17,5 millones de personas por este motivo. En España, 120.859 en 2018, según el INE.

No son los únicos que están investigando al respecto. En la Universidad de Minnesota han impreso en 3D una bomba cardíaca humana, según publicó en julio la revista *Circulation Research*, de la American Heart Association. En el pasado, diferentes investigaciones habían intentado imprimir células del músculo cardíaco, que se derivan de las células madre pluripotentes (que tienen el potencial de convertirse en cualquier tipo de célula del cuerpo) sin éxito. En este estudio, los investigadores cambiaron el proceso y funcionó. “Al principio, probamos

cardiomiocitos de impresión 3D, y fallamos”, dijo entonces Brenda Ogle, investigadora principal del estudio. Después, descubrieron que podían lograr el objetivo de una alta densidad celular en menos de un mes para permitir que las células latieran juntas como un corazón humano. ¿Cómo? Imprimiendo las células madre primero.

“La bomba cardíaca se imprimió como una estructura completa de acuerdo con la plantilla de impresión, que se genera reduciendo la escala de una resonancia magnética de un corazón humano al tamaño de un corazón de ratón. Además, el tabique entre los ventrículos se eliminó parcialmente para proporcionar un paso para que el flujo unidireccional pudiera propagarse a través de la estructura impresa y facilitar la entrega de nutrientes. La estructura se modificó aún más para limitar las conexiones

vasculares a dos vasos principales que se extienden desde la parte superior de la estructura, correspondientes a la aorta y la vena cava de la plantilla digital”, explica Ogle. Todo un acierto, ya que lograron que el modelo de músculo cardíaco que “mide hasta 1,3 cm de largo” se contrajera espontánea y sincrónicamente, precisa la experta, que recuerda que “algunos tejidos impresos en 3D, incluidos el hueso, la córnea, el oído y la piel, se han trasplantado con éxito al cuerpo humano y se encuentran actualmente en ensayos clínicos o preclínicos. Sin embargo, para órganos más complejos como el hígado, el riñón y el corazón, aún hay muchos obstáculos que superar antes de tenerlos en nuestro cuerpo”. Ahora bien, “este avance representa un paso crítico hacia la generación de tejidos a macroescala, y este modelo será útil para comprender la remodelación asociada con

la progresión de la enfermedad cardíaca. También permitirá probar la toxicidad o eficacia de un fármaco y, dada la escala, es susceptible de probarse en ratones y, quizás, algún día, el trasplante clínico”, concluye.

### El precio de los recambios

No es lo mismo llevar un traje a medida que uno de tienda. Lo mismo sucede con las prótesis, pero al igual que pasa con los trajes a medida el precio cambia. “Siguiendo siendo más caro imprimir prótesis en 3D a medida que hacerlos por talla”, explica Ferran Fillat Gomà, especialista en Cirugía Ortopédica y Traumatología del Hospital Parc Taulí (Sabadell) y director del Laboratorio de Impresión 3D. “El recambio de cadera estándar cuesta unos 4.000 euros, mientras que un recambio personalizado está entre los 10.000 y los 12.000”. Ahora bien, como destaca Fillat, utilizando esta tecnología “se reducen los tiempos de quirófano. Con una plantilla impresa en 3D ahorras entre 20 y 30 minutos en una cirugía. En los implantes, la cirugía dura entre 30 y 60 minutos menos, según la intervención que sea”. En un futuro “la idea es que el precio sea similar. De hecho, ya hay algunos productos en los que sucede” si se tienen en cuenta otros factores. “En una cirugía maxilofacial sale hoy más a cuenta optar por un implante personalizado que no por uno estándar, porque da menos complicaciones y ahorras tiempo, lo que al final iguala costes. En el caso de la prótesis de rodilla, tiene ya casi el mismo precio”. Por eso, “en los próximos cinco años se igualarán los costes”, estima Fillat. Por cierto, cuatro de las piezas impresas en 3D en este laboratorio pueden verse hasta el 19 de septiembre de 2021 en la exposición “PRINT3D” en Cosmocaixa.

Otra aplicación avanzada es el tratamiento de la patología del aneurisma del arco aórtico (de donde emergen los



Prótesis generada en el Laboratorio de Impresión 3D del Hospital Parc Taulí de Sabadell.

## Impresión 3D en el sector nuclear

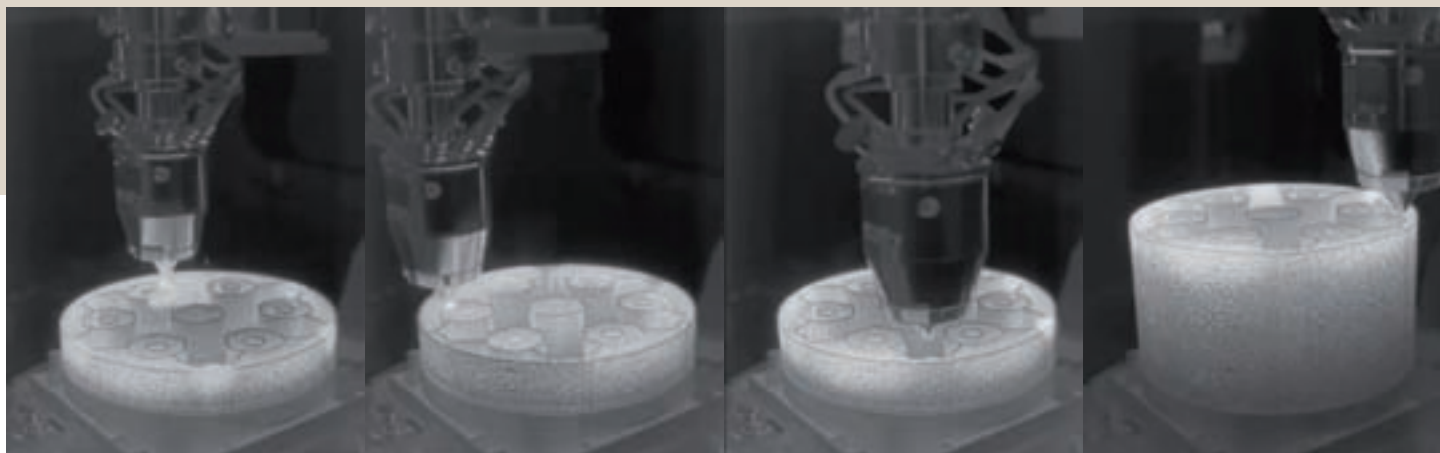
Un campo en el que la impresión en 3D tiene ya aplicaciones, probablemente insospechadas, es el la energía nuclear. La multinacional Westinghouse instaló en mayo el primer componente de combustible con tecnología 3D dentro de un reactor nuclear comercial. Es la primera instalación de su clase para la industria nuclear, explican desde Foro Nuclear. Se trata de un dispositivo de conexión de tipo dedal que fue instalado en la Unidad 1 de la central de Byron (EE UU) aprovechando la parada para recarga de combustible de la planta. Otro hito fue el logrado años atrás por Siemens, al conseguir en 2017 operar de forma segura con una pieza impresa en 3D en la central eslovena de Krško. Se trata de una pieza de repuesto para una bomba de protección anti incendios, cuyo fabricante original ha desaparecido.

El sector nuclear apuesta a gran escala por esta tecnología, tanto para el diseño y mantenimiento de centrales como para la fabricación de prototipos y repuestos, ya que se pueden crear componentes robustos, fiables y resistentes a elevadas temperaturas, según Foro Nuclear. Una de sus ventajas es que permite simplificar los procesos de fabricación, lo que ayuda a reducir los costes. De hecho, gracias a la aplicación de la impresión 3D el sector prevé un incremento del 15 % en su eficiencia durante las fases de diseño e ingeniería en las centrales. Además, el número de revisiones se reducirá en un 25 % y los tiempos de control de la calidad de ingeniería, en un 30 %. A su vez, la impresión en 3D de piezas de repuesto

puede ayudar a minimizar los residuos y reducir los tiempos de fabricación a una décima parte, como persigue GE Hitachi Nuclear Energy (GEH). Ahora bien, de momento una de las limitaciones es el tamaño de los objetivos que se pueden imprimir. Por ello, en GEH se limitará a componentes de 400 mm<sup>3</sup>, aunque ya tiene preparados para imprimir una serie de componentes que mejoran el rendimiento, como filtros de partículas o reactores de agua en ebullición.

Las futuras centrales también podrían beneficiarse de piezas impresas en 3D. Una de las investigaciones más potentes es la que está llevando a cabo el Laboratorio Nacional Oak Ridge de EE UU, que está refinando el diseño del núcleo de un reactor nuclear impreso en 3D. Todo un paso de gigante para la industria, ya que permitiría reducir los costos y los tiempos de fabricación de instalaciones nucleares de próxima generación. De momento, están ampliando el proceso de fabricación aditiva necesario para construirlo, tal y como informó en mayo el laboratorio. El objetivo: encender el primer reactor 3D en 2023.

En paralelo, están desarrollando diferentes métodos para confirmar la consistencia y seguridad de los componentes, utilizando diferentes tecnologías de monitorización que les permite evaluar de forma continua el material impreso y su rendimiento a través de inteligencia artificial. Además, los investigadores también realizan pruebas exhaustivas a posteriori para evaluar el rendimiento de los componentes y establecer vínculos entre el comportamiento de cada pieza única y sus datos de fabricación en vivo.



vasos vitales que irrigan el cerebro) utilizando un modelo 3D. El Hospital HM Montepríncipe se convirtió en septiembre en el primero en utilizarlo en España. El paciente tratado tenía una lesión

con alto riesgo de rotura, por lo que había sido descartado para una cirugía abierta. Como no era posible usar una de las prótesis estándar de las que disponían, contactaron con el Fab Lab

Madrid CEU que dirige Covadonga Lorenzo. “Cuando el bazo sanguíneo está deteriorado se necesita hacer una endoprótesis, que requiere bastante tiempo para fabricarse. Al estar en pleno estado

Como parte del despliegue de un reactor impreso en 3D, también crearán una plataforma digital que ayudará a entregar la tecnología a la industria para una rápida adopción de la misma. Es decir, una mirada al futuro de esta tecnología en un momento en el que más de la mitad de los reactores de EE UU se jubilarán en los próximos 20 años, al vencer el plazo de vida útil estipulado y ampliado.

Eso en el campo de fisión nuclear. En el de fusión, tecnología que ha avanzado de forma significativa en los últimos años, también se investiga la fabricación aditiva. Vicente M. Queral, ingeniero industrial especializado en fusión termonuclear, investigador del Laboratorio Nacional de Fusión del Ciemat, trabaja en la fabricación aditiva para construir un stellarator a escala experimental, un tipo de dispositivo para producir energía de fusión por confinamiento magnético alternativo a los tokamak.

Con este dispositivo pretende demostrar que es posible abaratar los costes de producción gracias a la impresión 3D, ya que “dadas las propiedades geométricas tan complejas de los stellarators se necesitan fresadoras para hacer surcos y orificios en posiciones difíciles. Esta complejidad geométrica no implica un incremento de costes al hacerlo mediante fabricación aditiva, lo que abarata los precios”. En cambio, en el caso de los tokamak, dispositivos geoméricamente más sencillos, “no se abarataría, por lo que no se pretende fabricar en 3D ya que sería incluso más caro”.



Pieza de stellarator generada mediante impresión 3D en el Ciemat.

Queral empezó en 2012 a construir componentes para los stellarators a modo de prueba. “Completo no hay ninguno en el mundo, solo uno parcial que construimos en 2013-2014 y que es sólo un tercio del dispositivo”. El material ideal para ciertos stellarators son los metales. “De momento, fabricar stellarators con esta tecnología es más caro, pero calculo que dentro de entre tres y cinco años serán más económicos”. A su favor, “que permite que la fabricación sea más rápida. La tecnología aditiva tiene mucho futuro, pero también mucho presente y pasado, cabe recordar que comenzó hace unos 30 años, y cada vez tiene —y tendrá— más mercado”, concluye. ▶

Proceso de crecimiento y piezas del reactor generadas por impresión 3D en el Laboratorio Nacional Oak Ridge estadounidense.



de alarma no había posibilidad y el paciente lo requería de forma urgente. Para reproducir a escala real la aorta de este paciente, usamos PLA, un plástico transparente que es más rígido que otros

polímeros”. Hicieron varios prototipos calentando el plástico a temperatura de fusión y empleando una nube de puntos para hacer un modelado 3D exacto de la aorta. “Los hicimos translúcido, flexible y transparente para ver cuál les servía como molde”, ya que a un paciente no le puedes implantar material plástico

dentro de su organismo. Después, los sanitarios emplearon esta reproducción como molde para poder hacer la endoprótesis que es la que le pusieron al paciente, quien recibió el alta 48 horas después de la intervención. Y todo ello sin esperas: “En una semana y media ya tenían el molde” porque en la fabricación de cada pieza se tardaron “entre siete y ocho horas”, en vez de tener que esperar más de cuatro semanas, algo esencial en pacientes de alto riesgo. ©



## Las misiones del Servicio Internacional de Asesoría en Protección Física del OIEA

El Organismo Internacional para la Energía Atómica (OIEA) desempeña en el ámbito internacional un papel central en la coordinación de esfuerzos, el intercambio de información y la asistencia a sus Estados Miembros en materia de seguridad física nuclear, mediante la realización de diferentes programas y actividades, encontrándose entre ellos los servicios internacionales de asesoría. En seguridad física nuclear, de entre estos servicios destaca el Servicio Internacional de Asesoría en Protección Física, que proporciona a los Estados Miembros que lo soliciten una asesoría mediante la evaluación de su régimen estatal de seguridad física de los materiales e instalaciones nucleares y de otro

material radiactivo y de sus instalaciones y prácticas asociadas; tomando como referente los instrumentos legales internacionales vigentes, las recomendaciones y orientaciones publicadas por el OIEA en esta materia y la experiencia colectiva del equipo internacional de expertos que llevan a cabo la misión de este servicio. Este artículo trata de los aspectos fundamentales de este servicio y de sus misiones, de la experiencia española en este tipo de misiones y de los aspectos claves que a juicio de los autores aseguran el éxito de este tipo de misiones.

■ Texto: **Pedro Lardiez Holgado \***, **Antonio Pérez Báez \*\***, **Miguel Calvín Cuartero \*\*\*** | CSN ■

**E**l Servicio Internacional de Asistencia en Protección Física (conocido internacionalmente como IPPAS por sus siglas en

\_\_\_\_\_

\* Jefe del Área de Seguridad Física, \*\* técnico senior del Área de Seguridad Física, \*\*\* subdirector de Emergencias y Protección Física.

inglés), se creó en 1995 en el seno del OIEA a requerimiento de su Junta de Gobernadores. Se solicitó del OIEA la prestación de un servicio de asistencia a aquellos Estados Miembros que lo solicitaran basado en una evaluación de sus respectivos regímenes de seguridad física nuclear.

La primera misión de este servicio fue llevada a cabo en 1996, tomándose como referencia la Convención de Protección Física de los Materiales Nucleares de 1980, así como el documento INFCIRC 225 /Revisión 3 del OIEA sobre seguridad física de los materiales nucleares.

Inicialmente, IPPAS fue diseñado para la protección del material nuclear contra el robo o la retirada no autorizada y de las instalaciones nucleares y del material nuclear contra el sabotaje radiológico, pero a partir del año 2003, tras la celebración de la Conferencia General del OIEA, su alcance se expandió para abarcar también la protección de otro material radiactivo y de las instalaciones y prácticas asociadas al mismo.

En 1999, tras la celebración de una reunión de consultores en 1998 para analizar la experiencia adquirida en varias misiones IPPAS, se publicó la primera versión de las Directrices IPPAS, que fue posteriormente revisada en 2012 y 2014, constituyendo la versión en vigor de las directrices en la actualidad.

Desde su creación hasta finales del año 2019, se han llevado a cabo un total de 90 misiones a 54 países, en las que han participado más de 140 expertos procedentes de 36 Estados Miembros.

### El carácter de las misiones IPPAS

Una misión IPPAS está pensada como una revisión inter pares para la evaluación del régimen nacional de seguridad física nuclear de un Estado. Esta evaluación se realiza comparando las organizaciones, los procedimientos y las prácticas empleadas en ese Estado con las disposiciones de los instrumentos legales en vigor, tanto vinculantes como no vinculantes, así como con las recomendaciones del OIEA en materia de seguridad física nuclear. Por lo tanto, la misión IPPAS ni es ni se debe entender como una inspección reguladora.

La misión es conducida por un equipo internacional de expertos en seguridad física nuclear o en otros campos relevantes, seleccionados por el OIEA y aceptados por el Estado anfitrión.

El enfoque empleado en estas misiones está basado en el desempeño del régimen estatal de seguridad física

nuclear, por lo que se deben considerar diferentes aproximaciones nacionales para obtener los objetivos y principios de dicho régimen.

El propósito de una misión IPPAS es asesorar al Estado anfitrión en la mejora y el reforzamiento de su régimen nacional de seguridad física. Para ello, el equipo de la misión debe identificar áreas o aspectos susceptibles de mejora y formular recomendaciones y sugerencias para solventar o mejorar dichos aspectos y para reforzar el régimen nacional analizado. El equipo de misión también debe identificar buenas prácticas llevadas a cabo en el Estado anfitrión, que pueden ser notificadas a otros Estados, con el fin de mejorar sus respectivos regímenes nacionales a largo plazo.

Los instrumentos jurídicos internacionales vinculantes y no vinculantes que se toman como referencia para el desarrollo de las misiones IPPAS son:

- La Convención de Protección Física de los Materiales Nucleares (CPFMN), recogida en el documento INFCIRC-274 del OIEA, de mayo de 1980, y su enmienda (E/CPFMN), de septiembre de 2005.
- El Código de Conducta sobre la seguridad tecnológica y la seguridad física de las fuentes radiactivas (CoC), de 2004.

En cuanto las recomendaciones y las mejores prácticas reconocidas internacionalmente que actualmente se toman como referencia para el desarrollo de las misiones IPPAS están descritas en:

- OIEA NSS<sup>1</sup>-20 Objetivos y elementos esenciales del régimen de seguridad física nuclear de un Estado.
- OIEA NSS 13 Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física del material nuclear y de las instalaciones nucleares (INFCIRC 225/Revisión 5)
- OIEA NSS 14, Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre el

material radiactivo y sus instalaciones asociadas.

Las recomendaciones realizadas por el equipo de misión deben estar necesariamente basadas en la CPFMN, en la E/CPFMN, en el CoC o en las publicaciones de los pilares de fundamentos (NSS-20) y recomendaciones (NSS 13 y NSS 14) de la serie NSS del OIEA.

Todas las recomendaciones, sugerencias y buenas prácticas identificadas por el equipo que realiza la inspección, se recogen en el informe de la misión, cuyo primer borrador es entregado al Estado anfitrión antes de que el equipo abandone su territorio. El informe es clasificado como altamente confidencial por el OIEA y no puede ser revelado por el OIEA a terceros, en todo o en parte, sin la autorización expresa del Estado anfitrión.

Aunque el OIEA aconseja encarecidamente la implantación de las recomendaciones y sugerencias recogidas en el informe, el Estado anfitrión es quien toma la decisión de hacerlo o no, en todo o en parte, ya que la responsabilidad de establecer, implantar y mantener el régimen nacional de seguridad física de un Estado es de la responsabilidad exclusiva del mismo.

### Objetivo y alcance de las misiones IPPAS

Los objetivos de las misiones IPPAS son, por tanto, los siguientes:

- Proponer recomendaciones y sugerencias para corregir problemas o mejorar aspectos encontrados en la evaluación del régimen nacional de seguridad física del Estado anfitrión.
- Proponer recomendaciones y sugerencias para mejorar la eficacia de los sistemas de protección física de las instalaciones y los materiales nucleares y otros materiales radiactivos, así como de sus instalaciones y prácticas asociadas, y de los transportes.

- Promover el intercambio de información y de experiencias entre los profesionales y expertos del Estado anfitrión y los expertos del equipo internacional de la misión, proporcionando a todos ellos la oportunidad de expandir sus conocimientos y experiencia en el campo de la seguridad física nuclear.

Los resultados de las misiones IPPAS no solo van dirigidos a las autoridades competentes del régimen nacional de seguridad física del Estado anfitrión sino también a otras autoridades del Estado, a los titulares de instalaciones y materiales nucleares y radiactivos, a los transportistas de estos materiales y a otras entidades reguladas dentro de dicho régimen.

El alcance de las misiones IPPAS ha de ser lo suficientemente flexible para ser de utilidad para todos los Estados miembros del OIEA, independientemente de la extensión de sus respectivos programas nucleares o del empleo de materiales radiactivos. Por ello, las misiones IPPAS poseen un enfoque modular que cuenta en la actualidad con los siguientes módulos:

1. Revisión nacional del régimen de seguridad física para instalaciones y materiales nucleares.
2. Revisión de la seguridad física de una instalación nuclear.
3. Revisión de la seguridad física del transporte.
4. Seguridad física del material radiactivo y de las instalaciones y prácticas asociadas.
5. Revisión de la seguridad informática.

Cada Estado miembro, en función de sus necesidades particulares, puede establecer el alcance de una misión IPPAS de acuerdo con el OIEA, incluyendo dentro de su alcance uno o varios de estos módulos. El módulo 4 sobre seguridad física de material radiactivo es un módulo autónomo que puede establecer el

alcance de las misiones IPPAS para aquellos Estados en los que solo se utiliza material radiactivo y carecen de material nuclear. En otros Estados, el módulo 1, sobre la revisión nacional del régimen de seguridad física, es el módulo que de forma natural debe estar incluido en la primera misión IPPAS que se reciba. Existe la posibilidad de que un mismo Estado, a lo largo del tiempo, solicite más de una misión IPPAS para, por ejemplo, analizar diferentes partes de un extenso programa o diferentes tipos de instalaciones nucleares o radiactivas.

La revisión nacional, módulo 1, al menos incluirá la revisión de los siguientes asuntos:

- Organización del Gobierno, asignación de responsabilidades, obligaciones internacionales y cooperación internacional.
- Marco legislativo y regulador.
- Autoridades competentes, funciones y responsabilidades.
- Procesos de licenciamiento y autorización.
- Coordinación con otras organizaciones nacionales que contribuyen a la seguridad física.
- Evaluación de la amenaza y amenaza base de diseño.
- Enfoque informado por el riesgo.
- Mantenimiento del régimen de seguridad física.
- Planificación y respuesta a eventos de seguridad física nuclear.

El número de recomendaciones, sugerencias y buenas prácticas resultantes de una misión IPPAS no es un buen indicador para comparar la eficacia de los diferentes regímenes nacionales de varios Estados, ya que las misiones son conducidas por diferentes equipos internacionales formados de diversa forma con diferentes expertos de acuerdo con el alcance de cada misión.

No obstante, las Directrices IPPAS<sup>2</sup> están orientadas a aumentar la consistencia

y a complementar la experiencia de los expertos que constituyen cada equipo de misión. Así, para cada una de las áreas a revisar, dentro de cada uno de los módulos mencionados, describen: los objetivos de la revisión, las bases para la revisión, la documentación a analizar, los puntos a analizar y ejemplos de preguntas a realizar para complementar todos los puntos que debe incluir cada revisión.

Las directrices IPPAS no son sólo útiles para los expertos que componen los equipos de misión sino también para los Estados miembros, ya que ayudan en el proceso de decisión a aquellos Estados que piensan solicitar una misión al OIEA y ayudan a preparar la misión y a realizar una autoevaluación a aquellos Estados miembros que van a recibir una misión.

## El Proceso IPPAS

El proceso IPPAS está constituido por diferentes fases, comenzando con la solicitud formal al OIEA por un Estado miembro y finalizando con la implantación completa de recomendaciones y sugerencias que, en función de la complejidad y el alcance de la misión, se puede extender desde cinco hasta doce meses.

El proceso IPPAS presenta muchas analogías con los procesos empleados para la preparación de otras misiones de asesoría y asistencia del OIEA, como por ejemplo las misiones del Servicio Internacional de Revisión Reguladora (IRRS), de las que España ha recibido ya tres (2008, 2010-*follow up* y 2018). Por ello no merece mucho la pena extenderse aquí en la descripción en cada una de las diferentes fases del proceso, encontrándose una descripción muy detallada en las referencias. En cualquier caso, estas fases son:

- Si procede, celebración de un taller IPPAS en el Estado candidato.
- Solicitud formal de la misión al OIEA.

- Designación de un oficial técnico (OT) del OIEA y de un punto de contacto (nombre y organización) del Estado anfitrión de la misión. Selección del líder del equipo de expertos, en consulta con el Estado anfitrión.
- Celebración de la reunión preparatoria de la misión.
- Selección de los expertos del equipo de misión.
- Preparación del paquete de información previa (PIP).
- Conducción de la misión propiamente dicha.

misiones, por ejemplo las IRRS, sólo alcanzan a los organismos reguladores.

Para garantizar la seguridad de la información utilizada durante todo el proceso de una misión IPPAS, todos los expertos que componen el equipo de la misión deben firmar un acuerdo de confidencialidad con el OIEA antes de conocer la información sensible referente al régimen nacional del Estado anfitrión. Además, estos expertos también deben estar preparados para firmar acuerdos de confidencialidad con las autoridades nacionales del Estado anfitrión, de acuerdo con sus disposiciones nacionales al

En cualquier caso, toda la información recibida y generada por el equipo durante la misión, en cualquier formato: impreso, electrónico o digital, deberá ser destruida o entregada al Estado anfitrión antes de que el equipo abandone su territorio.

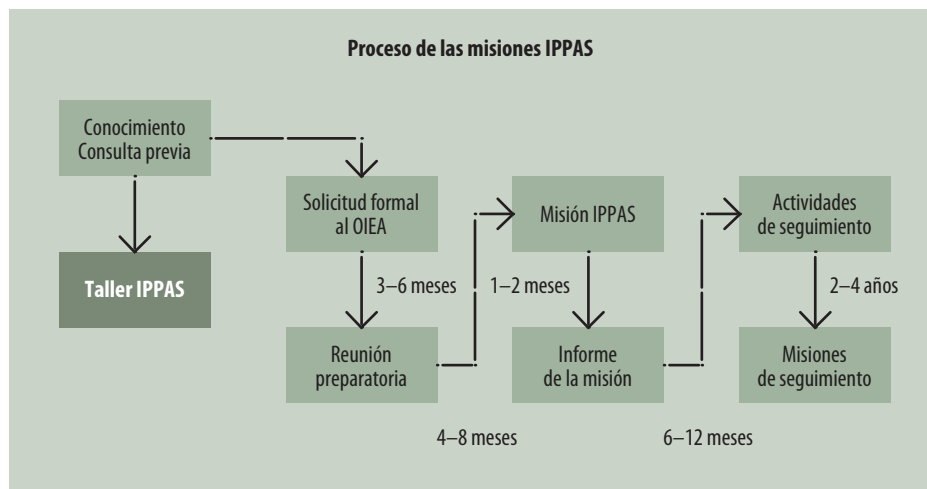
### Experiencia española en las misiones IPPAS

La experiencia española en misiones IPPAS del OIEA puede ser considerada bajo dos puntos de vista: como Estado donante o como Estado receptor.

Como Estado donante, España ha participado activamente en el programa IPPAS del OIEA. Expertos del Área de Seguridad Física (SEFI) de la Subdirección de Emergencias y Protección Física (SEP) del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) han participado en varias misiones IPPAS como expertos o como líderes del equipo de misión. Así mismo, expertos de la misma área del CSN han participado en talleres y seminarios del OIEA sobre el programa IPPAS para formarse como candidatos a formar parte de los equipos internacionales para estas misiones.

Como Estado receptor y formalmente hablando, España no ha recibido aún ninguna misión IPPAS del OIEA.

Es cierto que la parte reguladora del régimen español de seguridad física fue evaluada y revisada con ocasión de la misión IRRS recibida en el CSN en el año 2008. Fue la primera misión IRRS del OIEA en la que en su alcance se incluyó la seguridad física nuclear. La revisión fue llevada a cabo por tres expertos con gran y contrastada experiencia internacional en seguridad física nuclear, que se dedicaron exclusivamente a esta materia durante esta misión. El alcance y extensión de esta revisión coincidieron prácticamente con los que ahora se describen para el módulo 1, revisión nacional, de las misiones IPPAS actuales.



- Actividades de seguimiento, en su caso.
- Conducción de una misión de seguimiento o follow up. Al cabo de dos años de realizar una misión, el mismo equipo de expertos vuelve, a petición del Estado anfitrión, a comprobar el estado de implantación de las recomendaciones y sugerencias.

La gran diferencia de las misiones IPPAS respecto a otras misiones de asesoría del OIEA es la sensibilidad de la información a emplear, cuya confidencialidad, disponibilidad e integridad deben ser protegidas para preservar también la seguridad física de las instalaciones y los materiales nucleares y radiactivos. Así mismo, las misiones IPPAS poseen un alcance estatal, mientras que otro tipo de

respecto, antes de comenzar la misión.

Por otra parte, queda a la discreción del Estado anfitrión determinar qué información y bajo qué grado de clasificación será proporcionada o revelada al equipo de misión. Todos los expertos de dicho equipo han de ser tratados con el mismo grado de probidad.

Por otra parte, los expertos del equipo de misión se comprometen a proteger, de acuerdo con las disposiciones, prácticas y procedimientos vigentes en el Estado anfitrión y en sus autoridades competentes, la confidencialidad, integridad y disponibilidad de las notas técnicas y de los borradores de las diferentes secciones del informe de misión que se vayan elaborando durante la misión.



Foto de familia en la sede del CSN de la IRRS que se llevó a cabo en 2008 y en la que se incluyó un apartado dedicado a la seguridad física

En aquella misión se identificaron cuatro recomendaciones, ocho sugerencias y dos buenas prácticas que se dieron por totalmente implantadas en la misión IRRS de seguimiento recibida por el CSN en 2010.

En el año 2011, después de estas misiones, se publicó el Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre seguridad física de las instalaciones y los materiales nucleares, que estableció los objetivos y las bases del actual régimen nacional de seguridad física que es posterior a la realización de estas misiones.

En el ámbito internacional, en el entorno del Estado español, se reconoce como buena práctica solicitar y recibir misiones IPPAS para evaluar el sistema nacional cada diez años, por lo que sin duda el Estado español debería pensar seriamente en solicitar cuando ello sea pertinente una misión IPPAS al OIEA, toda vez que en la última misión IRRS recibida en el Estado español se excluyó la seguridad física nuclear por existir misiones del OIEA específicas para ello, como las propias misiones IPPAS.

En este sentido conviene indicar que el Plan Estratégico 2020-2025 del CSN, en su objetivo número 3 sobre el

fortalecimiento de las capacidades del CSN en materia de emergencias y seguridad física, se establece la actividad de solicitar y gestionar la realización de una misión IPPAS para España en el periodo 2022-2024.

### **Aspectos claves para el éxito de la misión IPPAS**

La experiencia adquirida por los autores de este artículo en la preparación, conducción y participación en los equipos internacionales en diferentes misiones IPPAS<sup>3</sup> permite identificar diferentes aspectos que se podrían considerar claves para el éxito de una posible futura misión IPPAS a recibir por el Estado español.

Un aspecto a considerar es el carácter de las misiones IPPAS. No son inspecciones sino revisiones inter pares que tienen como propósito asesorar al Estado anfitrión sobre cómo mejorar su régimen nacional de seguridad física. Por lo tanto, el número de recomendaciones o de sugerencias no es lo más importante sino disponer de información suficiente para que las autoridades competentes puedan mejorar y reforzar dicho régimen.

Otro aspecto interesante es el intercambio de información y experiencia entre profesionales de las autoridades competentes españolas y el equipo internacional de expertos. Respetando y protegiendo la información sensible hasta y cómo sea necesario, cuanto más fluido, extenso, franco y veraz sea este intercambio, los beneficios de la misión serán mayores.

Sin duda, preparar una autoevaluación de la situación, franca, objetiva y veraz, considerando las directrices IPPAS será un buen punto de partida para conocer aquellos aspectos que suscitarán un mayor interés en la evaluación.

También la extensión, la profundidad y el esmero con que se prepare el paquete de información previa (PIP) son de la máxima importancia. Cuanto más extensa y detallada sea esta información, menos dudas existirán en el equipo de la misión y más tiempo se podrá dedicar durante la misma a analizar la situación en lugar de dedicarlo a aclarar dudas básicas sobre la misma.

Por último, es muy necesario recordar que el régimen español de seguridad física involucra a varias autoridades nacionales competentes<sup>4</sup>, cada una de ellas



Técnicos del CSN han participado en las misiones IPPAS realizadas a Uruguay (arriba) y Paraguay.

con una atribución específica y bien documentada de funciones y responsabilidades propias, así como a otras autoridades que, aunque no son parte del régimen, colaboran en el mismo<sup>5</sup> y, por supuesto, los titulares de las instalaciones, materiales y transportes. Todas estas entidades deben estar presentes, debidamente coordinadas

en la conducción y en la preparación de la misión IPPAS.

### Conclusiones

En la actualidad, en el ámbito internacional, se considera una buena práctica recibir una misión IPPAS cada 10 años para analizar el régimen nacional de

seguridad física propio de cada Estado, con el fin de detectar áreas susceptibles de mejora y refuerzo de dicho régimen mediante la implantación de las recomendaciones y sugerencias emanadas de este tipo de misiones conducidas por equipos internacionales de expertos procedentes de los Estados miembros del OIEA.

España, formalmente hablando, nunca ha recibido una misión IPPAS, aunque diferentes expertos españoles en seguridad física nuclear, procedentes del CSN, sí han participado activamente en el programa IPPAS del OIEA en la conducción de este tipo de misiones.

El Plan Estratégico 2020-2025 del CSN, incluye la actividad de solicitar y gestionar la realización de una misión IPPAS para España en el periodo 2022-2024, en coordinación con el resto de las autoridades nacionales competentes en materia de seguridad física nuclear.

Este artículo ha presentado alguna de las características y de los aspectos de este tipo de misiones para proporcionar información acerca de las mismas y para incrementar el éxito de una potencial misión del servicio IPPAS al Estado español en un futuro próximo. 

<sup>1</sup> NSS se utiliza en este artículo para nombrar la colección de orientaciones del OIEA sobre seguridad física nuclear o Nuclear Security Series. Con la abreviatura NSS es como se conocen los diferentes documentos que componen dicha serie.

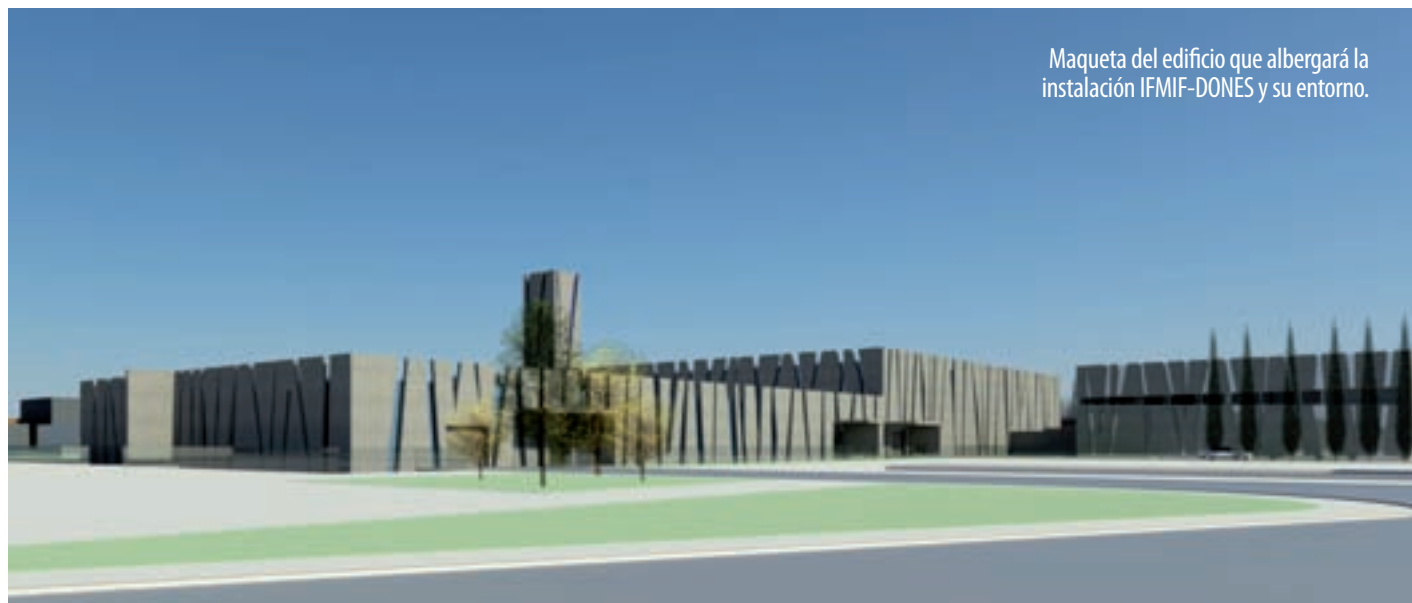
<sup>2</sup> OIEA- International Physical Protection Services Guidelines

<sup>3</sup> Chile, Méjico, Países Bajos, Bélgica, Estados Unidos, Cuba, Uruguay, Paraguay, etc.

<sup>4</sup> Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, Ministerio del Interior, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.

<sup>5</sup> Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Agencia Estatal de Administración Tributaria (Aduanas), Centro Nacional de Inteligencia, etc.

Maqueta del edificio que albergará la instalación IFMIF-DONES y su entorno.



El pueblo de Escúzar es el favorito para acoger la instalación IFMIF-DONES, clave en la consecución de esta fuente energética

## El camino granadino a la fusión nuclear

En un mundo hambriento de energía, la fusión nuclear es una promesa permanente de saciedad. Entre los problemas pendientes de resolver para allanar el camino de esta opción, destaca el de los materiales que deberán soportar las reacciones que se producirán en el interior de los reactores de fusión. Para resolverlo se ha puesto en marcha el proyecto IFMIF-DONES, un potente

acelerador de partículas cuyo objetivo es generar neutrones de muy alta energía para cualificar esos materiales. Una iniciativa conjunta de Croacia y España, avalada por el Programa de Fusión Europeo y de varios países europeos, que propone instalar esa instalación en Escúzar, un pueblo de Granada.

■ Texto: **Eugenia Angulo** | Periodista científica ■

**E**scúzar es un pueblo a 25 kilómetros al sur de Granada, antes de llegar al mar. Tiene 791 habitantes, diez de ellos extranjeros. En todo 2018 no nació un solo niño, y tanto el cura como el alcalde anduvieron huérfanos de matrimonios. En el departamento de defunciones tuvo el cura más trabajo: diez. Podría ser uno de los pueblos de las soledades que tanto abundan en España, acostumbrados a ver la vida transfundirse a las ciudades.

Otro asunto hace que Escúzar tenga algo muy contemporáneo. Unos veinte años atrás se construyó en su término

municipal el flamante Parque Metropolitano Industrial y Tecnológico. Con cuatro millones de metros cuadrados, había nacido con la vocación de convertirse en el mayor parque industrial de Andalucía. Hoy, apenas algo más de la mitad está ocupado por una treintena de empresas. Para el diario *Granada Hoy*, el parque “se convirtió en un proyecto fallido dejando unos terrenos en estado de abandono.” Un espejismo, en sueño que no fue. Una escultura incierta, una rotonda solitaria, un aeropuerto sin aviones.

En este duermevela se hallaba el pueblo cuando se vio, no ya bien

amarrado a su presente, sino mirando de frente al futuro. Escúzar es la propuesta conjunta de España y Croacia para construir en los terrenos abandonados de su parque industrial una máquina única: el acelerador de partículas más potente del mundo, DONES. En él se experimentarán los materiales que darán forma a los reactores de fusión del futuro. La Agencia Europea de Fusión, impulsora de DONES, anda preocupada especialmente por uno, el reactor DEMO, siguiente parada en su mapa para conseguir el sueño de una energía barata, limpia y casi inagotable.

Entendiendo que el tiempo en fusión nuclear no es de fiar, el acuerdo que existe hoy en la Unión Europea es que, si se finalmente se aprueba la construcción de DONES en Europa, se hará en Escúzar. La propuesta española tiene a Croacia como socio principal, está avalada por el Programa Europeo de Fusión y, sobre el papel, cuenta con el apoyo de varios países europeos de peso, entre ellos Alemania, Francia, Hungría, Italia y Polonia.

De momento, la fusión nuclear es un sueño. Producir electricidad con un vaso de agua y el litio que alimenta la batería de un móvil en un mundo que consume barriles de petróleo de forma voraz, sin duda lo es. Pero también algo de pesadilla. Aquellas en las que intentas correr y no pasas de levantar levemente las rodillas. La pesadilla en los sueños de fusión se llama ITER, un experimento internacional de 25.000 millones de euros que prosigue su dolorosa construcción en Cadarache, a una hora de Marsella. Ha sufrido retrasos tras retrasos, presupuestos tras presupuestos. Y, aun así, tiene mucho de milagro: sus países socios —Europa, Estados Unidos, India, China, Japón, Rusia—, representan el 70 % de la humanidad, que se ha unido para realizar un experimento valioso: demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión produciendo un plasma que devuelva diez veces la energía que se le suministró.

En pocas palabras, ITER no encenderá ni una bombilla, —es un experimento, un reactor de potencia cero—, pero su sucesor DEMO, sí tendrá que producir electricidad de una forma realista; será lo que se llama un reactor demostrador de potencia. Si ITER es el proyecto de ingeniería más complejo de la historia, DEMO, precursor de las futuras plantas comerciales de fusión, el eslabón entre el experimento y la realidad, seguramente le supere.

Aunque aún no ha empezado a discutirse dónde se construiría y tampoco



Acelerador lineal de la instalación previa del proyecto en Rokkasho (Japón).

está claro que vaya a ser un proyecto internacional —los desarrollos tecnológicos que se consigan en DEMO tendrán impacto comercial lo que hará más difícil compartir información—, los socios de ITER ya están pensando cómo les gustaría que fueran sus versiones de DEMO. Europa, Japón, China y Estados Unidos han lanzado programas de ingeniería e I+D específicos. Pero hay una pregunta urgente de cuya respuesta depende la existencia misma de este reactor, sea como sea, se construya donde se construya: ¿qué materiales podrán sobrevivir al medio hostil que encontrarán en el corazón de DEMO?

### Un inhóspito ambiente

No hay nada más sencillo en este mundo que un átomo de hidrógeno, y qué prodigio de la naturaleza que, cuando los físicos ponen en contacto a dos de ellos, y les obligan a vencer, a base de temperatura y presión, su gigantesca repulsión inicial, ocurra una reacción íntima tan poderosa, tan fundamental, que libera una cantidad de energía apabullante, una tremenda capacidad de hacer algo. Si ese algo es simplemente dejar que la reacción ocurra sin control, se logró con éxito hace 70 años cuando la primera bomba de hidrógeno explotó sobre el atolón de Eniwetok, en las Islas Marshall. Una parte del atolón desapareció para siempre. Pero controlar la fuerza de esta reacción es algo que lleva intentándose 70 años.

La máquina que los físicos ha inventado para ello es un lugar extraño: se necesita aportar tanto calor y tanta presión a la reacción que su interior se vuelve

más caliente que el mismo centro del Sol, las temperaturas rugiendo a más de cien millones de grados. Además, se producen un montón de neutrones muy especiales, de alta energía, que, al carecer de carga, no se pueden dirigir a ninguna parte, y quedan rebotando sin control contra las paredes del reactor, dañando los materiales y poniendo en riesgo la supervivencia de la estructura.

Los materiales que formen DEMO y los futuros reactores comerciales de

fusión tendrán que aguantar estas condiciones durante tiempos suficientemente largos para sea rentable. Los programas de fusión de Europa, Japón y Estados Unidos han ido desarrollando varios tipos de materiales, pero no saben cómo reaccionarán a la realidad inhóspita que encontrarán en DEMO. Necesitan probarlos, pero a día hoy no existe ninguna fuente en el mundo capaz de generar estos neutrones de tanta energía.

## Política y tiempo

En 2016, el Programa Europeo de Fusión lanzó una convocatoria para ver qué países estarían interesados en albergar DONES. España, Croacia y Polonia levantaron la mano, pero solo los dos primeros presentaron una propuesta formal. Antes de que finalizara la evaluación europea, España y Croacia alcanzaron un acuerdo para presentar una candidatura conjunta con una sola sede: Escúzar, Granada. En 2017 se tomó el acuerdo de que, si finalmente se decide construir DONES en Europa, se haría en Granada. Pero ese acuerdo aún no se ha tomado.

“DONES se tenía que haber aprobado hace algunos años. El principal problema es que es difícil conseguir, no quiero utilizar la palabra política, pero que los gestores, digamos de alto nivel, tomen la decisión de lanzar otra instalación relacionada con fusión”, dice Ángel Ibarra, jefe de la división de tecnología del Laboratorio Nacional de Fusión del Ciemat. “En general, el ambiente está

preocupado por ITER, y la respuesta de quien está fuera del campo de fusión es esperar a que arranque, que esté funcionando, y cuando veamos que ya no hay problemas, empezamos a hablar de la siguiente. El problema cuando estás metido en el tema es que sabes que entonces, inmediatamente DEMO viene mucho después. Hacen falta las dos cosas a la vez”, añade.

En 2018 DONES dio un paso importante con su ingreso en la codiciada ES-FRI, la lista de proyectos considerados estratégicos para el porvenir de Europa, por la que en su día pasaron el CERN o la

Fuente Europea de Espalación. “Se presentó ahí porque eso ya da un marchamo de calidad. Sufrimos una evaluación de casi un año, técnica, socio-económica, de compromiso político por parte de los gobiernos interesados. Eso consolidó DONES como proyecto europeo, ya no del Programa de Fusión, damos



Ángel Ibarra.



un paso más: esto es un proyecto estratégico para Europa, para que Europa mantenga su competitividad”, explica Carlos Alejaldre, director general del CIEMAT, y director ejecutivo de la propuesta española de DONES.

La fuerza de este compromiso es, por supuesto, de naturaleza económica. DONES costaría unos 600 millones de euros de los cuales España se ha comprometido a aportar la mitad. De ese importe, un 80 % se pagaría con fondos estructurales europeos. Es una de las razones por las que la localización de Escúzar es tan conveniente: Andalucía puede acceder a los fondos FEDER de forma que el dinero neto que tiene que poner España es relativamente pequeño, del orden de los 120 millones. Éstos provendrían mitad y mitad de la Junta de Andalucía y del Gobierno central. El pasado mes de mayo, el Parlamento español aprobó la autorización para la constitución de un consorcio entre ambos gobiernos para gestionar el proyecto y el Gobierno dio su visto bueno en diciembre.

Antes de obtener el sello definitivo, España quiere demostrar la firmeza de su compromiso y tanto Junta como Gobierno central han aportado ya 16,3 millones de euros cada una. En Escúzar empiezan a levantarse varios laboratorios y la Universidad de Granada y el Ciemat están lanzando ya contratos de personal.

Además del acceso a fondos FEDER, Escúzar tiene algo muy básico: espacio. El Ayuntamiento ha cedido 100.000 metros cuadrados de su parque industrial, y dispone de suministros importantes de luz y agua. También “la infraestructura, no tanto local, de emplazamiento, sino la infraestructura tecnológica y científica de la zona es muy importante. Hacer una cosa así en un sitio en el que haya una universidad, centros de investigación, industria que apoye, es importante”, concluye Ibarra. En ese sentido, el apoyo de la Universidad de Granada y del propio CIEMAT es total. El principal inconveniente es que es zona sísmica, lo que afecta a los costes de diseño. ▶

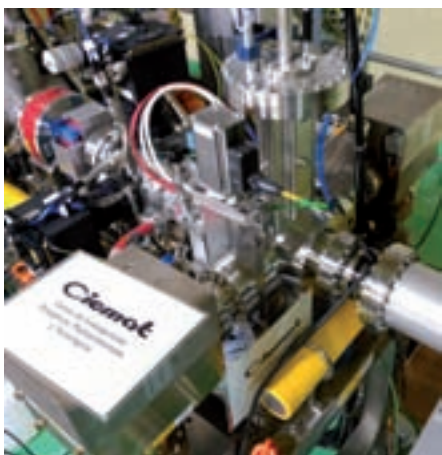


Carlos Alejaldre.

IFMIF-DONES —formalmente, International Fusion Materials Irradiation Facility-Demo Oriented NEutron Source— es la máquina que Europa ha ideado para recrear la realidad inhóspita de DEMO. Los materiales que sobrevivan a un tiempo en su interior habrán sido, en jerga técnica, validados y licenciados. Es un proyecto a dos tiempos: primero vendría IFMIF-DONES, una versión simplificada, más sencilla, para obtener cuanto antes información y que se construiría en Escúzar. En un futuro impredecible, podría ampliarse a IFMIF a secas. Y la instalación original, dado su carácter modular, podría ser la candidata ideal para la instalación ampliada.

A grandes rasgos, DONES es una máquina formada por un acelerador de iones de deuterio, o deuterones, que se harán incidir contra un blanco de litio líquido en movimiento, el lazo de litio. En esa interacción se producen los neutrones con los que irradiarán los materiales.

Si la complejidad existe en cada parte de DONES, en el acelerador se asoma al límite de lo posible. “Hay que tener en cuenta que va a ser el más potente del mundo, no digo que sea el más grande, los del CERN son mucho más grandes, pero la corriente es tan grande, la potencia que tiene que mover es tan alta, que hace que todos los componentes del acelerador, los componentes del blanco, la gestión de las muestra, todo, esté en la frontera de lo que se puede hacer en este momento en las tecnologías de aceleradores, en las tecnologías de metales líquidos, y en materiales”, explica Ángel Ibarra, jefe de la División de Tecnología del



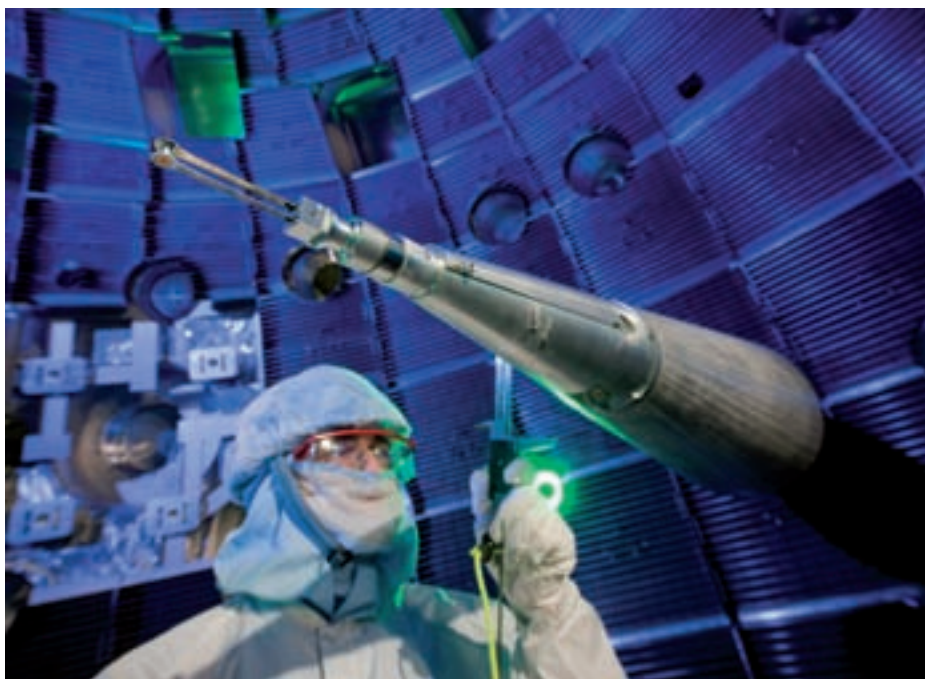
Elemento diseñado y producido por el Ciemat en el acelerador lineal de Japón.

Laboratorio Nacional de Fusión del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat).

Ibarra es también el alma técnica de DONES. Desde 2015 dirige el grupo WPENS de EUROFusion que trabaja en su diseño de ingeniería (EUROfusion es un consorcio de los laboratorios europeos que trabajan en desarrollar el programa de fusión). Ibarra tiene un gran sentido del humor. Cuando se le pregunta por los avances de ITER, se echa a reír. Cuando la pregunta trata del enrevesado camino de DONES por Europa, también. Pese a ello, se declara optimista.

El verano pasado en Rokkasho, en el norte de Japón, Ibarra y un grupo de expertos japoneses y europeos que trabajan en ciertos prototipos de DONES consiguieron un récord mundial: transmitir la corriente más alta, 125 mA, transmitida nunca en un acelerador.

La colaboración entre Europa y Japón se engloba dentro de The Broader Approach, un acuerdo que firmaron en 2007 para construir prototipos de las partes más complicadas de DONES, concretamente, la parte de baja energía del acelerador y el lazo de litio. El acuerdo ha finalizado este año y se ha extendido para la explotación de estas máquinas, pero con ellas no se irradiarán materiales, “son prototipos, para comprobar que sabe-



Cámara donde se producen las reacciones de fusión de la National Ignition Facility (EE. UU), cuyas paredes reciben una intensa radiación neutrónica.

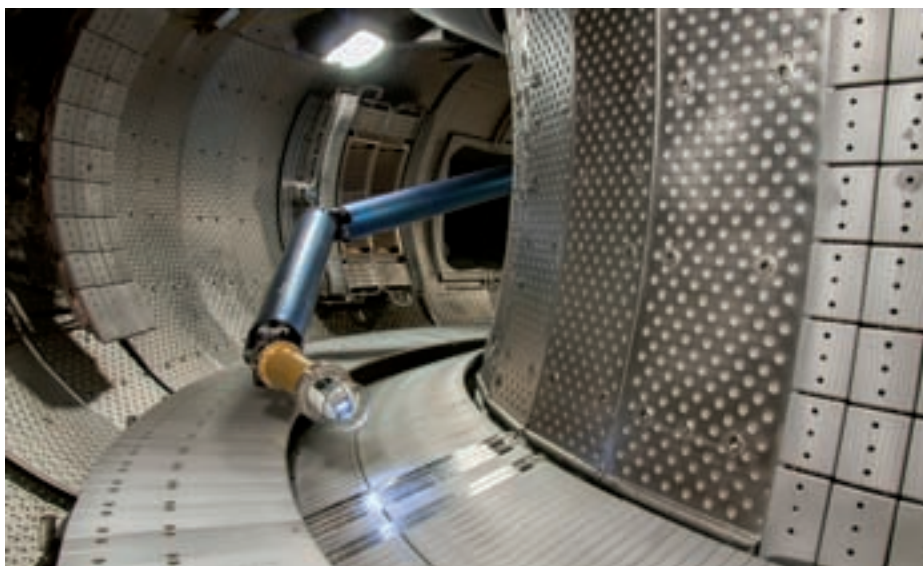
mos cómo manejarlos y que el diseño técnico puede funcionar”, explica el físico español. El prototipo del lazo de litio se construyó, se probó durante un tiempo relativamente largo y se desmanteló, ofreciendo unos resultados que Ibarra califica como positivos.

El acelerador huele a Mediterráneo. España, Francia e Italia se encargan de su construcción y todos los componentes, salvo uno, están ya en Japón. “Naturalmente no se puede poner todo en marcha de golpe y lo que estamos haciendo es una puesta en marcha, digamos, por fases. Primero se puso en marcha el inyector, naturalmente hubo un montón de problemas y dificultades, pero se vio que funcionaba. A continuación, se ha puesto en marcha el RFQ (uno de los dispositivos que intervienen en el proceso) y hemos comprobado que funciona bien en modo pulsado, es decir, con relativamente pocos deuterones. Ahora lo que falta es demostrar que puede hacerse en modo continuo”, detalla. El equipo espera que el año que viene funcione con todos los componentes. Y después, que tenga éxito.

“Naturalmente todo va mucho más despacio de lo que se esperaba. Primero porque es el acelerador de corriente más alta que se ha construido nunca. Al arrancar hay muchas cosas que no funcionan bien y que hay que arreglar porque claro, los componentes del acelerador se han construido en distintos países y aunque ha habido una coordinación entre todos, cuando los pones juntos hay problemas. Y además es que montar una cosa en el norte de Japón no es fácil. Probablemente no hay suficiente gente trabajando allí, debería haber más y, digamos, también hay dificultades de gestión, que las cosas funcionen adecuadamente”, opina Ibarra.

### Granada en el epicentro del futuro

Si hay una instalación que en este momento lidera el programa mundial de fusión nuclear es ITER. “Desde el punto de vista tecnológico, la siguiente va a ser DONES, lo que significa que España va a estar colocada en una posición privilegiada a nivel mundial. No habrá otra instalación como DONES y de los resul-



Estudio del comportamiento de componentes de tungsteno en el reactor West.

tados que salgan de allí dependerá la velocidad, e incluso la posibilidad, de tener o no tener ese reactor de fusión DEMO”, explica Carlos Alejaldre, director del comité ejecutivo encargado de preparar la propuesta española de DONES.

“Tenemos que validar y licenciar sus materiales de primera pared porque el organismo encargado de la seguridad nuclear del país en que se construya querrá conocer perfectamente cómo se comportan los materiales bajo irradiación. Esa información solo la podremos dar desde DONES. Con lo cual, se construya DEMO en China, Japón, EE. UU., Rusia o Europa, el valor del conocimiento que va a salir de DONES va a ser único en el mundo. En ese sentido, cualitativamente, es poner Granada en el epicentro de la fusión mundial”, añade.

Carlos Alejaldre es el actual director general del Ciemat y se dice que la calidad de la propuesta que España presentó para acoger ITER en su momento, que fue excelentemente valorada a pesar de que no ganó, tuvo mucho que ver con él. Alejaldre también tiene un gran sentido del humor y pocas dudas de que en 2021 se formalizará el acuerdo político a nivel europeo que confirme la construcción de DONES.

“Creemos que es perfectamente posible. El compromiso español es muy fuerte y creo que eso ha sido entendido por toda Europa”. Tal es la confianza que los primeros laboratorios ya empiezan a levantarse en los desamparados terrenos de Escúzar *motu proprio*, con aportaciones de la Junta de Andalucía y el Gobierno central. En este punto, la historia ya no es tan contemporánea: los tres niveles de la Administración, central, autonómico y local, están remando en la misma dirección.

Y luego está la economía. Según los cálculos de Ibarra, la actividad económica que DONES generaría en la zona sería del orden de los 2.000 millones de euros. “Al final con una inversión de 100, 150 o 200 millones, estás generando un retorno por valor de 2.000. Ojalá pudiéramos hacerlo todos los días. Pero también está el retorno científico, que es más difícil de medir, pero el hecho de que tengas una instalación única en el mundo, porque durante muchos años no va a haber ninguna parecida a esta, hará que los que trabajen y hagan experimentos allí, estén en la frontera de lo que se puede hacer. Desde el punto de vista técnico estamos listos”. Aunque es una máquina orientada a hacer

estudios de materiales para fusión, los neutrones tan especiales que produce podrán aplicarse en otras áreas del conocimiento, como biomedicina o estudios de materiales genéricos.

“DONES tiene vocación de ser un instrumento internacional. Naturalmente, al ser europeo y financiado con fondos europeos, el papel que jugarán nuestros expertos en materiales y las empresas europeas será muy importante, pero desde luego va a estar totalmente abierto. Ya estamos iniciando discusiones con otros socios de ITER para ver si estarían interesados en participar en el futuro, que conozcan bien lo que estamos haciendo y ver cómo podemos integrar también sus necesidades”, concluye Alejaldre. Uno de los países que está como observador en todos los comités es Japón. No en vano, llevan trabajando juntos en los prototipos de DONES y parece que empiezan a tener más prisa en construir su DEMO.

Imaginemos que el tiempo se comporta como debe y los plazos se cumplen. Se aprueba la construcción de DONES, produce la información de la que depende DEMO, se completa su diseño de ingeniería y en torno a 2050 empieza, con esfuerzo, a construirse en algún punto más o menos desamparado del globo. Los expertos menos sospechosos de pesimismo creen que quizás, podría producir electricidad antes de que finalice este siglo.

¿Cuántos habitantes pasearán entonces por Escúzar? ¿Cuántos niños habrán nacido a la sombra de DONES? ¿Cuántos matrimonios habrán celebrado el cura y el alcalde? ¿Qué idiomas se escucharán en sus casas blancas, sus suelos empedrados? Muchos de los científicos que llevan toda su carrera profesional, o buena parte de ella, viéndoselas con la fusión, probablemente nunca lleguen a ver cómo ilumina el mundo. Lamentablemente para el tiempo aún no hay acelerador posible. De momento.



# Reacción en cadena

■ Texto: **Hugo Barcia** | Periodista científico.

## NOTICIAS

### Módulos habitables para vivir en la Luna

La Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) presentó el pasado mes de noviembre la fase preliminar de uno de sus objetivos principales para sus futuras misiones espaciales: establecer una base lunar habitada de forma



permanente. Para conseguirlo, han propuesto la instalación de una especie de módulo lunar con una tecnología de

capa estructural inflable que permitiría a los futuros colonos del satélite terrestre poder asentarse en él por un tiempo indefinido. El lugar seleccionado para situar el habitáculo sería el cráter Shackleton, cerca del Polo Sur. Esta opción ofrecería acceso a la luz solar de forma continua y depósitos de hielo de agua lunar que se hallan en cráteres de las proximidades.

Según la ESA, los principales desafíos de la operación son proteger la instalación de la radiación solar y aprovechar al máximo los recursos lunares, de forma que permitan trabajar dentro del requisito de energía pensado para el hábitat, que es de 60kw. Esta propuesta ha sido presentada por la Concurrent Design Facility (CDF), uno de los principales centros de evaluación de la ESA, con sede en Holanda y que entró en funcionamiento en el año 2000.

No obstante, por el momento la idea se enmarca en un contexto puramente teórico, puesto que no se han acordado aún soluciones de diseño sólidas. El objetivo es identificar los requisitos necesarios para la implementación de su diseño, incluido el transporte a la Luna, su construcción y puesta en servicio como una vivienda habitable de manera segura.

### Un análisis de sangre para detectar el Alzheimer

El análisis de dos moléculas de sangre podría ser suficiente para predecir el deterioro futuro de las capacidades mentales y la posterior aparición de la enfermedad de Alzheimer en las personas, según un estudio publicado el pasado mes de diciembre en la revista *Nature Aging*. De acuerdo con la publicación, las proteínas que se acumulan en el cerebro, que se estima que provocan la muerte neuronal que conduce a la demencia, circulan por el torrente sanguíneo, por lo que una prueba de sangre podría ser utilizada para diagnosticar la enfermedad o distinguirla de otras formas comunes de demencia.

El experto Oskar Hansson, de la Universidad de Lund (Suecia), y su equipo desarrollaron modelos que podrían predecir el riesgo de deterioro cognitivo de un individuo y la posterior transición al Alzheimer, según se indica en la revista. Para ello, los investigadores utilizaron datos

de 573 pacientes con deterioro cognitivo menor. En concreto, compararon la precisión de varios modelos, basándose en combinaciones de biomarcadores sanguíneos, para predecir el deterioro cog-



nitivo y la demencia durante varios años. El uso de este tipo de marcadores resalta la importancia de emplear combinaciones específicas de biomarcadores de sangre para hacer predicciones individualizadas sobre la progresión de la enfermedad de Alzheimer. Según afirmaron los expertos, esto podría ayudar a realizar nuevos tratamientos durante las fases tempranas de la enfermedad.

**EFEMÉRIDES ► HACE 75 AÑOS...****La resonancia magnética nuclear**

En 1946, el físico norteamericano de origen suizo, Felix Bloch (1905-1983) y su colega Edward Nukks Purcell (1912-1997) desarrollaron de forma independiente nuevas formas

y métodos para establecer mediciones de precisión magnética nuclear, un logro que les reportaría el premio Nobel de Física en 1952. La nueva técnica, llamada resonancia magnética nuclear, permitía estudiar de manera no invasiva el interior de los organismos vivos. Se fundamenta en la propiedad de las sustancias químicas que les permite absorber ciertas frecuencias de radiación de microondas

cuando se encuentran dentro de un campo magnético fuerte, estable y homogéneo. En particular, los núcleos atómicos actúan como pequeños imanes giratorios, y pueden alinearse en un campo magnético, con el fin de reforzar la absorción de las microondas. Actualmente, esta tecnología de amplio uso médico se denomina simplemente resonancia magnética, evitando emplear el término nuclear por sus connotaciones negativas.



Felix Bloch en su laboratorio.

**La supernova más brillante que no se llegó a producir**

El oscurecimiento de la estrella Betelgeuse, a principios de 2020, pudo deberse a la emisión por parte del propio astro de nubes de polvo que bloquearon su brillo. Es una de las principales causas que barajan los astrónomos para explicar cómo el hombro derecho de Orión vio reducida su luminosidad en el firmamento hasta niveles nunca registrados en los últimos 150 años, según aclaró un artículo publicado el pasado mes de noviembre en *Science News*. Esta situación alarmó a los expertos y les hizo creer que la muerte de la estrella podía estar mucho más próxima de lo que esperaban. De hecho, el final del cuerpo celeste habría dado lugar a la que habría sido la supernova más brillante de la historia, debido a su cercanía con

la Tierra, aunque su explosión no acarrearía consecuencias sobre nuestro planeta.

A pesar de su corta edad, que los astrónomos cifran entre los 8 y 10 millones de años, en comparación con el Sol,

que tiene 4.500 millones, a Betelgeuse apenas le quedan como máximo 200.000 años de vida, momento en el cual se espera que se produzca la supernova. Esto se debe a que su tamaño, superior al del Sol, provoca que agote el combustible de su núcleo a un ritmo extremadamente rápido.

Las supernovas son la consecuencia de la muerte violenta de aquellas estrellas que cuentan con una masa ocho veces superior a la del Sol. No obstante, los astrónomos aún no saben con certeza cuándo una estrella está a punto de explotar, tal y como ha sucedido con Betelgeuse, y tan solo pueden ofrecer un intervalo de tiempo en el cual se espere que se produzca el fenómeno.



The image shows a screenshot of the 'Visual Elements' website. The periodic table is displayed with various elements highlighted in different colors. The element 'Aluminium' (Al) is highlighted in green. The website interface includes search bars, filters, and a list of elements on the right side.

## La tabla periódica en todo su esplendor

En 1869, el químico ruso Dmitri Mendeleiev acabó con el quebradero de cabeza de muchos científicos tras establecer las bases de las modernas tablas periódicas. La clave de su propuesta fue el ordenamiento en función de las masas atómicas y de las valencias de los elementos, que el científico estableció en columnas.

A pesar del gran número de ejemplos de tablas que

existen, una de las más destacadas es la realizada por el artista escocés Murray Robertson. Bajo el nombre Visual Elements, permite al espectador contemplar imágenes de cada uno de los elementos. Se puede encontrar en la web de la Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/periodic-table>, donde si se selecciona un elemento, se puede conocer un poco más acerca de la historia de su descubrimiento, así como otros datos más específicos como sus isótopos,

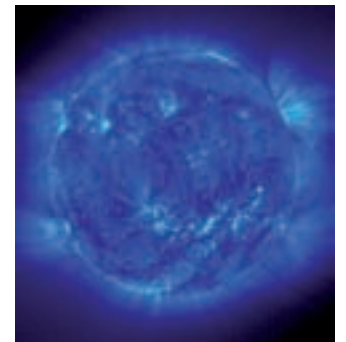
sus usos y propiedades para el día a día o tasas de producción y en qué países es más frecuente encontrarlo.

## Los misterios del Sol en tu pantalla

La influencia del Sol en la Tierra es inmensa. No solo afecta al clima y a las mareas, también a fenómenos terrestres que pueden parecer insospechados, como la aparición de auroras boreales, numerosas interferencias en las telecomunicaciones, las subidas de corriente en las líneas eléctricas o la corrosión de oleoductos. Todos ellos guardan relación con lo que se conoce como *tiempo solar*, los cambios que, de forma semejante a los del tiempo atmosférico, se producen en corrientes continuas de plasma que emite el Sol y que se conocen como viento solar.

El Sol libera continuamente miles de millones de

toneladas de materia y cuando estas inmensas nubes de material solar alcanzan la Tierra pueden producir grandes tormentas magnéticas en el entorno espacial alrededor del planeta. Para poder prevenir estas situaciones, la NASA lanzó el 2 de diciembre de 1995 conjun-



tamente con la ESA la sonda espacial Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), cuyos progresos se pueden seguir en su página web: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>. En ella se puede acceder a imágenes, publicaciones y las últimas noticias.

## LIBROS

### ¿Estamos solos?

**Carlos Briones**

Editorial Crítica

Barcelona, 2020

La revolución de la exploración espacial y la astronomía a la que hemos asistido en las últimas décadas nos plantea la eterna cuestión que aborda el investigador del Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA) Carlos Briones: ¿Acaso



estamos solos en el Universo? Desconocemos si

existen formas de vida similares a las humanas en el Cosmos o si constan de características totalmente diferentes, pero estas inquietudes no solo responden al ámbito de la ciencia, también es necesario tener en cuenta otros aspectos fundamentales relacionados con la filosofía, la literatura, las artes plásticas o la música. Este libro aúna todos estos elementos, que

acompañarán al lector en el fascinante viaje por el tiempo y el espacio que propone el autor. Por el momento, la investigación en astrobiología busca indicios de vida en las cercanías, en planetas como Marte, en satélites como Europa y Titán, y en otros cuerpos menores del Sistema Solar. ¿Cuándo será posible resolver una de las preguntas más intrigantes de la Historia?

## EXPOSICIÓN

**Santiago Ramón y Cajal**

Abierta hasta el 5 de diciembre de 2021

**Museo de Ciencias Naturales**

José Gutiérrez Abascal 2, Madrid

Santiago Ramón y Cajal fue el primer español galardonado con un Premio Nobel de Ciencias, que le fue concedido en 1906 por sus trabajos y aportaciones a la neurociencia. Considerado como uno de los padres de disciplina, gracias a él la ciencia española dio un salto de gigante y alcanzó un elevado reconocimiento internacional.

Esta exposición nace con el objetivo de mostrar la cara más personal del científico y mostrar el camino que siguió para convertirse en una de las figuras más relevantes de la historia de la

ciencia. Junto al Premio Nobel que recibió y que preside la muestra, aparecen las herramientas de trabajo que Ramón y Cajal empleó durante sus investigaciones, algunos de los numerosos dibujos que realizó y otros documentos relativos a sus trabajos. Además, la exposición rinde homenaje al 100 aniversario del nombramiento del científico como director del entonces conocido como Centro y Laboratorio de Investigaciones Biológicas, que hoy en día se conoce como Instituto Cajal (CSIC), y que alberga el legado Cajal, de donde se ha obtenido la mayor parte del material expuesto.

De forma paralela y complementaria, se celebra un ciclo de conferencias para conmemorar esta efeméride, que tendrán lugar hasta el 25 de febrero de 2021 en el salón de actos del Museo Nacional de Ciencias Naturales. ▶



## REDES



[@nasahubble](#)

Perfil que publica las mejores imágenes tomadas por el telescopio Hubble. Gracias a él se pueden contemplar fotografías de galaxias, estrellas y otros rincones desconocidos del universo.



[@mujerconciencia](#)

Se dedica exclusivamente a publicar artículos sobre mujeres científicas para visibilizar su situación en un sistema que, históricamente, ha estado protagonizado por varones.



[CDeCiencia](#)

Canal de divulgación científica que repasa las noticias y descubrimientos más relevantes del mes y profundiza en temas de actualidad.



[Agencia Sinc](#)

Cuenta oficial de la Agencia Sinc, agencia de noticias científicas españolas que publica todos sus contenidos bajo licencia *Creative Commons*, para favorecer su difusión entre el público.



[Sciencewithana](#)

Perfil de Tik Tok que cuenta con cerca de 1 millón de seguidores. Cada día, su autora, Ana Laura Pacheco, publica contenido de divulgación científica, como experimentos o curiosidades. ▶

# La banda sonora de la era atómica (1945-1969)

De entre todos los acontecimientos que han marcado un antes y un después en la historia del planeta Tierra pocos pueden presumir de haberlo hecho de manera tan absoluta como cuando el 16 de julio de 1945 EE. UU. probó con éxito la bomba nuclear en Alamogordo y menos de un mes después lanzó sendas bombas atómicas contra Hiroshima y Nagasaki. El hombre había creado un armamento capaz del Armagedón planetario, con la posibilidad de extinguir a nuestra propia especie, así que es normal que su impacto se viera reflejado en todo tipo de manifestaciones artísticas, aunque puede que ninguna tan curiosa como la que se produjo en la música popular del país que lanzó las dos únicas bombas nucleares contra otros seres humanos, EE. UU. Nunca algo tan intimidante y peligroso inspiró letras tan bizarras como “He estado en Nagasaki, en Hiroshima también, lo mismo que les hice a ellas, pequeño, puedo hacértelo a ti. Porque soy una chica de Fujiyama y estoy a punto de explotar...” o “bueno, desde que te besé, nena, esa noche en el parque... Perdí mi cabello y cejas y mis dientes brillan en la oscuridad. Mujer radioactiva, trátame bien”.

■ Texto: **Sergio Ariza** | Periodista ■

Las explosiones en Hiroshima y Nagasaki dejaron cientos de miles de muertos y pusieron fin definitivo a la II Guerra Mundial con la rendición incondicional de Japón. Las primeras manifestaciones en canción sobre estos hechos trataban de lidiar con un poder desconocido y con el hecho de que EE. UU. fuera el único país con este tipo de armamento, así que varias de las canciones de finales de los 40 y comienzos de los 50 hacen una equiparación entre el poder atómico y el poder divino, con una consecuencia final, EE. UU. es el país elegido de Dios.

La más clara de estas demostraciones la podemos encontrar en el tema country *When They Found The Atomic Power* de Hawkshaw Hawkins, publicado en 1947: “Estuvieron trabajando en Los Álamos, Oak Ridge y el viejo Paso bajo un aguacero de lluvia. En esa hora cero buscando algún poder celestial mientras sonaba *Star Spangled Banner* (el himno estadounidense). Luego un

destello, un rugido estruendoso a través del suelo del desierto, habían encontrado la energía atómica desde arriba. Entonces Dios con su poderosa mano mostró al mundo lo que no podría soportar cuando encontraron el poderoso, poderoso Poder Atómico”.

Para otros, como los Buchanan Brothers existía un poder todavía mayor que el atómico, “Hay un poder mayor que el atómico. Es un poder del que se sienta en lo alto. Si nos golpea (nos golpea) con su poderoso poder no sólo morirán algunos, sino todos”. Aunque para Fred Kirby, otro cantante country, la bomba atómica no era sino la constatación del cabreo de Dios: “Dios se está cabreando mucho por las cosas pecaminosas que hemos hecho. Nos dio a todos esta tierra bendita y esto que no puedo entender, un arma de destrucción para destruirnos a todos. Cuando esa bomba del infierno caiga habrá gritos, moribundos, rezos...”

Muchas de estas canciones provenían del country, pero también hubo otros géneros que tocaron el tema, como el *Atomic Energy* de Sir Lancelot, un calypso publicado en 1947, que ya dejaba clara la mayor preocupación de EE. UU. y sus ciudadanos, seguir siendo los únicos con capacidad nuclear: “Todos podemos tener prosperidad con esta energía atómica, el mundo puede tener su cerdo y sus frijoles o ser volado en pedazos. Ahora le toca al pueblo hacer una cruzada para conseguir que no se hagan más bombas y que su gran fuerza sólo pueda ser utilizada por la paz y la democracia”.

## Los temores de la Guerra Fría

Pero eso se acabó el 29 de agosto de 1949 cuando la Unión Soviética (URSS) probó con éxito su primera bomba atómica en Semipalátsk, Kazajistán. Con la consecución del armamento nuclear por parte de la Unión Soviética, el mundo entró en un periodo de máxima tensión en el que, por primera vez, dos grandes potencias enfrentadas podían exterminarse la una a la otra con solo apretar un botón, fue lo que se conoció como Guerra Fría y, por supuesto, también tuvo su reflejo en la música popular. En abril de 1950 Blanchard and The Valley Trio sacaban una canción llamada *Jesus Hits Like an Atomic Bomb*, con una temática religiosa muy similar a las que hemos nombrado antes, pero con una frase que dejaba clara cuál era la nueva preocupación: “En 1949 los EE. UU. se volvieron muy sabios, descubrieron que un país al otro lado de la línea tenía una bomba atómica del mismo tipo, la gente del lugar se preocupó, al igual que antes les había sucedido a los japoneses”.

La paranoia de la posible destrucción atómica pronto se vio reflejada, aunque siguió habiendo bravatas como la de uno de los padres de la música country, Roy Acuff, quien en 1951 publicó *Advice To Joe*, una canción en la que advertía al mismísimo

Stalin: “Verás los relámpagos, escucharás los truenos atómicos rodar. Cuando Moscú yazca en cenizas, que Dios se apiade de tu alma. Aquí hay una pregunta, Sr. Stalin, y es usted quien debe decidir. Cuando las bombas atómicas empiecen a caer, ¿tienes un lugar para esconderte?”

Pero no todos estaban tan seguros del resultado de una posible guerra nuclear, los Talbott Brothers, un grupo de calypso originario de las Islas Bermudas, lo tenía claro en su *Atomic Nightmare* (pesadilla atómica): “Voy a correr, correr, correr como un hijo de puta. No sé a dónde voy a ir, pero voy a ir corriendo”. Y es que lo de cantarle al fin del mundo bajo un suave ritmo caribeño tiene su arte. Por otra parte, Arthur “Big Boy” Crudup, el hombre que compuso el *That’s All-right Mama* que haría famoso a Elvis Presley, estaría totalmente de acuerdo con ellos, como así lo dice en la expresiva *I’m Gonna Dig Myself a Hole*, publicada en 1951: “Creo que voy a cavar un agujero, y trasladarme con mi chica bajo suelo. Creo que cuando salga no quedará ningún muro en pie”. Una canción en la que se reflejaba la creación de los primeros refugios nucleares y el miedo reinante en la sociedad.

### Cuando Einstein está asustado...

Este miedo llevó a la aparición de la que se podría considerar la primera canción anti nuclear, *Old Man Atom*, compuesta por Vern Partlow y con versiones del patriarca de la música folk Pete Seeger o The Sons Of The Pioneers, un popular y longevo grupo vocal que fue el encargado de cantar los temas de varias películas de John Ford. Partlow, un periodista que había entrevistado a varios de los científicos que habían trabajado en el desarrollo de las armas nucleares mezclaba el humor y

la seriedad para hablar de un tema bastante grave: “Os voy a hablar de una cosa (...) esa cosa de la que Einstein dice que tiene miedo, y hermano, cuando Einstein está asustado tú también deberías estarlo”. O esos momentos en los que declaraba: “la gente en el mundo debe elegir una tesis, o paz en el mundo o el mundo en pedazos”.



Algunos de los discos que muestran el impacto del poder atómico sobre la música de los años cincuenta.

“Sostenemos que estas verdades son evidentes. Todos los hombres pueden ser cremados por igual”. Pero cuando la canción comenzó a ganar popularidad, a mediados del año 1950, se encontró con el auge del Comité de actividades antiamericanas del senador Joseph McCarthy y muchos la acusaron de comunista. Tanto es así que las grandes compañías discográficas retiraron todas las copias de la canción y tuvo que salir el New

York Times con un editorial para aclarar que si la canción tenía algún tipo de propaganda era americana y no rusa...

Malos tiempos para la lírica en unos años que vieron como el principal responsable del proyecto Manhattan y el desarrollo de la bomba atómica, Robert Oppenheimer, era acusado en el tribunal y se le retiraba su credencial de seguridad. Claro que el clima que se respiraba durante esos años, a comienzos de los 50, era terrorífico, en plena Guerra de Corea con una parte de la población, entre ella el

General McArthur, a favor de volver a utilizar armas nucleares contra Corea del Norte, algo que se ve muy bien reflejado en *When They Drop the Atomic Bomb* del cantante country Jackie Doll, en la que viene a decir que el presidente Truman es un blando y que habría que dejar que McArthur lanzara la bomba libremente: “Habrà fuego, polvo y metal volando por todas partes y la radiactividad los quemará hasta el suelo. Si queda algún comunista, todos saldrán huyendo... Si el General MacArthur lanza una bomba atómica”.

Por suerte no fue así y la Guerra Fría nunca llegó a que ninguno de los dos bandos utilizara su material nuclear. Algo que no hizo que fuera menos aterradora para la población mundial, siempre mirando de reojo a las dos superpotencias y a su explosiva relación, algo que llevó a una de las asociaciones más inauditas sobre el tema, con Floyd Tillman encontrando la metáfora perfecta en *Cold War With You* para un matrimonio que se está separando: “El Muro de Acero se alza en esta Guerra Fría contigo”.

## La fiebre del uranio

Pero la percepción de lo nuclear cambiaría cuando, el 8 de diciembre de 1953, el presidente de los EE. UU., Dwight D. Eisenhower, diera su famoso discurso de Átomos por la Paz en la Asamblea General de las Naciones Unidas. En él hacía promesas de un futuro pacífico en el que el uranio sería utilizado para reactores nucleares y no para armas, y en el que “la milagrosa inventiva del hombre no se dedicará a cosas que puedan traer su muerte, sino que se consagrará a su vida”. En el fondo era propaganda y no surtió particular efecto a la hora de reducir el armamento nuclear de ambas potencias; es más, durante el mandato de Eisenhower

nium de los Commodores, *Uranium Rock* de Warren Smith o esa locura llamada *Tic, Tic, Tic* de Doris Day sobre la diversión de tener un contador Geiger.

## Rock & Roll atómico

A mediados de los 50 la música popular vivió su particular explosión nuclear con la aparición del rock & roll, una música callejera y salvaje con un fuerte contenido sexual (no en vano el término venía de una expresión que utilizaban los afroamericanos para referirse al sexo), así que no era raro que desde el principio aparecieran varias metáforas “poéticas” sobre chicas atómicas y radioactivas. Así la *Atomic Baby* (chica atómica) de Amos Wil-

quando el Doctor Strangelove explica sus planes sobre el post apocalipsis nuclear.

Pero puede que nadie fuera tan lejos como una de las grandes voces del rockabilly, la mismísima Wanda Jackson, que fue novia de Elvis, y cantaba cosas tan audaces (y moralmente cuestionables) como estas en su *Fujiyama Mama*: “He estado en Nagasaki, en Hiroshima también y lo mismo que les hice a ellas, pequeño, puedo hacértelo a ti”. Lo increíble del caso es que la canción fue un éxito enorme en el



La cantante Wanda Jackson, una de las grandes voces del rockabilly, en el estudio de grabación.

EE. UU. pasó de tener 1.005 a 20.000 armas atómicas. Pero lo que sí produjo fue una fascinación por lo nuclear, una energía que pasó a ser vista como la perfecta respuesta para los contaminantes materiales fósiles.

Además, trajo su particular fiebre del oro; en este caso la fiebre del uranio, cuando tras el descubrimiento de un enorme depósito de uranio en Colorado, Charles Steen y Vernon Pick se hicieron de, valga la redundancia, de oro. De repente Colorado se llenó de gente con un contador Geiger y una pala en busca de uranio, algo que también reflejaría la música popular de la época con canciones como *Uranium Fever* de Elton Britt, *Ura-*

burn podía “encender tus cohetes y llevarte a la luna”, mientras que la *Atom Bomb Baby* (Chica bomba atómica) de los Five Stars “puede empezar una de esas reacciones en cadena en mi corazón, una gran explosión, grande y ruidosa que me hace sentir como una nube de hongo”, además de ser “un millón de veces más potente y caliente que el TNT”. Por otro lado, Bill Halley veía en la guerra nuclear y su devastación un posible sueño erótico, “Anoche soñé con la bomba H. Bueno, la bomba explotó y yo era el único hombre en pie... Había 13 mujeres y un solo hombre en el pueblo...”. Algo que posiblemente inspiró a Stanley Kubrick para la lujuria en los ojos de George C. Scott

Portada del disco *The Freewheelin' Bob Dylan*, varias de cuyas canciones hacían referencia a las armas atómicas y la radiactividad.



país afectado, Japón, donde subió a lo más alto de su lista de ventas en 1957.

Con la llegada de los 60 el McCarthyismo estaba de capa caída y comienzan a aparecer varias canciones que, cómicamente, vuelven a alertar del peligro nuclear, así Scott Peters se preparaba para la guerra nuclear escuchando a CONELRAD, la emisora de emergencia en caso de ataque

nuclear soviético: “Tengo un refugio contra la lluvia radioactiva, es de nueve por nueve. Un equipo de alta fidelidad y una jarra de vino. Dejaré que los misiles vuelen de nación a nación porque es tiempo de fiesta en mi emisora radioactiva” mientras que George McKelvey hablaba de los peligros de quedarse fuera del refugio en caso de ataque y las consecuencias que podía tener en su relación con su “chica



radioactiva”: “bueno, desde que te besé, nena, esa noche en el parque... Perdí mi cabello y cejas y mis dientes brillan en la oscuridad. Mujer radioactiva, trátame bien”.

### La canción protesta

Pero si algo marcó el comienzo de los 60 a la hora de tratar el tema nuclear fue la crisis de los misiles cubanos, el momento de la Guerra Fría en el que más cerca se estuvo de una guerra nuclear. El 20 de octubre

de 1962 aviones americanos detectaron barcos soviéticos que llevaban misiles nucleares a la Cuba de Fidel Castro y el mundo entró en un periodo de un mes en el que cada día pudo ser el último. Un año antes el gran Charles Mingus andaba rogando para que no lanzaran la bomba atómica, *Oh Lord Don't Let Them Drop that Atomic Bomb on Me*, pero nadie tenía muy claro que sus plegarias fueran a ser atendidas, ni mucho menos los propios Kennedy o Krushchev, sobre los que caía la responsabilidad de apretar el fatídico botón.

Algunos de los afectados no dudaban en pedir que lo hicieran, por parte estadounidense el bluesman Louisiana Red contaba que había tenido un sueño

ción que acabaría reflejando mejor aquella época *A Hard Rain's A-Gonna Fall*, grabada solo unos días después de la retirada de los barcos soviéticos, el 6 de diciembre de 1962, en la que la lluvia radiactiva se mezclaba con los poetas malditos franceses: “Oí el sonido de un trueno, que rugió sin aviso, oí el bramar de una ola que podría engullir el mundo entero”.

Otro de sus himnos fue el *Eve Of Destruction* que escribió P.F. Sloan y cantó Barry McGuire: “¿No entiendes lo que trato de decir? ¿No puedes entender los miedos que siento hoy? Si se presiona el botón, no hay escapatoria”. Aunque esta canción tendría contestación por parte de un grupo conservador llamado The



El grupo Crosby, Stills & Nash en 1969.

(*Red's Dream*) en el que le decía a Krushchev que se llevara “esa basura de Cuba” o le abriría la cabeza con un bate de béisbol, pero por parte cubana tampoco se echaban atrás y Carlos Puebla y sus Tradicionales respondían en ‘Rompiendo Relaciones’: “Y sepa el imperialismo, si con nosotros se mete, que los famosos cohetes no son ningún simbolismo (...) si vienen en guerra ni uno solo quedará”.

Normal que aquella crisis inspirara al que pasaría a ser conocido como la voz de su generación, un Bob Dylan que incluiría tres canciones demoledoras en su segundo disco, el influyente *The Freewheelin' Bob Dylan*, se trataba de *Talking World War III* la rabiosa *Masters Of War* y la can-

Spokesmen que sacó al mercado *Dawn of Correction* en el que decía que la potencia nuclear de EE. UU. era la que “mantenía a la gente libre de la dominación roja”.

Pero es evidente que los últimos años de la década, el rock y la música popular pasaron a ser claramente antinucleares con cosas como *I Come and Stand at Every Door* de los Byrds, *House at Pooneil Corners* de Jefferson Airplane o *Wooden Ships* de Crosby, Stills & Nash. Canciones que dejaban claro que la generación Woodstock estaba radicalmente en contra del armamento atómico y de la guerra en general, con un sencillo, pero efectivo, eslogan “amor, paz y música”. ©

# Panorama

## La presidenta del Congreso de los Diputados recibe al Pleno del CSN

La presidenta del Congreso de los Diputados, Meritxell Batet, recibió la mañana del pasado 4 de diciembre al Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear en el Palacio de las Cortes. La delegación del Consejo, encabezada por su presidente, Josep María Serena i Sender, informó a la presidenta del Congreso sobre los retos y las actividades reguladoras que ha llevado a cabo el Consejo durante el año 2020, marcado por la crisis sanitaria provocada por la covid-19. Se trata del primer encuentro de este tipo desde que el actual Pleno tomó posesión, en abril de 2019.



## La segunda revisión temática de ENSREG se centra en la protección contra incendios

El Plenario del Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG, por sus siglas en inglés) seleccionó, durante una reunión celebrada el 10 de noviembre, la protección contra incendios en instalaciones nucleares como el objetivo de la segunda revisión temática para la seguridad (Topical Peer Review, TPR). Por parte del Consejo de Seguridad Nuclear participaron en la reunión el presidente, Josep M<sup>a</sup> Serena i Sender, y el director técnico de Seguridad Nuclear, Rafael Cid Campo. Este ejercicio de revisión se desarrollará entre los años 2023 y 2024.

En próximas reuniones de ENSREG se establecerán las especificaciones técnicas y el calendario concreto de actuación, en colaboración con la Asociación Europea de Reguladores Nucleares, WENRA. De acuerdo con la Directiva de seguridad nuclear, cada seis años los Estados miembros deben llevar a cabo un ejercicio de revisión entre pares en un tema que ellos mismos han de aprobar. El primer ejercicio se centró en la gestión del envejecimiento de las centrales nucleares.

ENSREG es un grupo asesor de alto nivel, creado en 2007 a instancias de la Comisión Europea para elevar recomendaciones al Consejo de la UE y al Parlamento Europeo sobre seguridad nuclear y gestión de residuos nucleares.

## Reunión de trabajo entre el CSN y la Agencia Portuguesa del Medio Ambiente

El Consejo de Seguridad Nuclear mantuvo el pasado 10 de octubre una reunión de trabajo con la Agencia Portuguesa del Medio Ambiente (APA), que asume las labores de protección radiológica en el país vecino, durante la que se acordó el texto de un Memorando de Entendimiento (MoU) entre ambos organismos. Se espera que la firma de este acuerdo pueda efectuarse a principios de 2021. El encuentro sirvió también para acordar la revisión próxima del protocolo de cooperación en materia de emergencias radiológicas y nucleares que firmaron ambos organismos en 2015 a propuesta de la APA.



## Comités de información de Vandellós y Almaraz

Los días 19 y 25 de noviembre se celebraron las reuniones de los comités de información de las centrales nucleares de Almaraz (Cáceres) y Vandellós (Tarragona), respectivamente, en las que participó el Consejo de Seguridad Nuclear. Ambas se realizaron mediante videconferencia. Aunque la primera estaba previsto hacerla presencialmente en el mes de junio tuvo que posponerse por la pandemia. Ambas estuvieron presididas por el subdirector general de Energía Nuclear del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), José Manuel Redondo.

Los comités de información local, conforme a lo dispuesto en el artículo 13 del Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), tienen por objeto informar a las distintas entidades de la zona y a la población sobre el desarrollo de las actividades reguladas, así como tratar de forma conjunta las cuestiones que resulten de interés para todos. ▮

## Reunión del Comité Asesor para la información y participación pública

El Comité Asesor para la Información y Participación Pública del CSN celebró el pasado 26 de noviembre, de manera telemática, su vigésima edición. El encuentro, que contó con medio centenar de asistentes, fue dirigido por el presidente del CSN y del propio Comité, Josep María Serena i Sender, acompañado por los consejeros Javier Dies, Francisco Castejón, Elvira Romera y Pilar Lucio.

La reunión constó de dos presentaciones por parte del CSN sobre asuntos de actualidad, que realizaron Benito Gil, jefe del Área de Organización, Factores Humanos y Formación de la DSN, y



Miguel Calvin, subdirector de Emergencias y Protección Física, de la DPR.

El Comité Asesor para la información y participación pública del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), se puso en marcha en 2011 y está integrado por 37 representantes de la sociedad civil, del sector nuclear, de los sindicatos y

de las administraciones públicas de carácter estatal, autonómico y local, además de expertos del ámbito de la comunicación pública (cuyos cinco titulares fueron renovados por los que figuran en la imagen). Las recomendaciones y propuestas que emite este Comité no tienen carácter vinculante para el CSN. ▮

## El presidente del CSN se reúne en Viena con el director general del OIEA

El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Josep María Serena i Sender, se reunió el pasado 19 de octubre con el director general del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Rafael Mariano Grossi, en su sede de Viena, para establecer líneas de cooperación en 2021.



Durante la reunión, Serena i Sender transmitió a su interlocutor el apoyo del regulador español y se comprometió a mantener las aportaciones extrapresupuestarias anuales y la designación de expertos para actividades internacionales del OIEA. Además, Serena expuso el impulso que quiere dar al multilingüismo y, en concreto, al uso del español, mediante la preparación de un glosario de términos nucleares con las Academias de la Lengua de los países de Iberoamérica, en estrecha colaboración con el OIEA.

Por su parte, Grossi agradeció al presidente del CSN su visita y todo el apoyo recibido desde el regulador español, especialmente por el alto nivel de conocimiento de los técnicos del organismo español que están trabajando en el OIEA. También se comprometió a mantener un elevado nivel de contratación de expertos españoles a medida que otros vayan saliendo. ▮



## El CSN firma un nuevo acuerdo marco de colaboración con AMAC

El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Josep María Serena i Sender, y el presidente de la Agrupación de Municipios de Áreas con Centrales Nucleares y almacenamiento de residuos radiactivos (AMAC), Juan Pedro Sánchez, suscribieron el pasado 18 de diciembre un acuerdo marco de colaboración entre ambas instituciones para el desarrollo de actividades de formación, información, participación y divulgación en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, mediante futuros acuerdos específicos.

El convenio, que tiene una duración de seis años, sustituye al firmado en 2003, que dio lugar a tres acuerdos específicos en 2004, 2007 y 2011. Con él se pretende establecer la colaboración entre el CSN y el AMAC para realizar actividades de común interés que contribuyan a mejorar el conocimiento sobre la seguridad nuclear, el funcionamiento de las centrales nucleares y el almacenamiento de residuos radiactivos entre la población de las poblaciones situadas en los alrededores de estas instalaciones en España.



## HERCA discute la elaboración de una nueva estrategia para el periodo 2021-2026

El Comité de Dirección de la Asociación Europea de Autoridades Competentes en Protección Radiológica (HERCA, por sus siglas en inglés) se reunió el pasado mes de noviembre, de forma telemática, para elaborar una nueva estrategia para el próximo quinquenio 2021-2026. Durante la sesión, en la que la consejera Pilar Lucio representó al Consejo de Seguridad Nuclear, se revisaron las labores desarrolladas por los diferentes grupos de trabajo y se avanzó en la elaboración del borrador del documento que recoge la estrategia a seguir por la Asociación en los próximos cinco años. En concreto, la consejera Lucio destacó la necesidad de reforzar el proceso de toma de decisiones al más alto nivel de HERCA, para que la eficiencia de la asociación no se vea comprometida. También remarcó la necesidad de fomentar el intercambio de información con las asociaciones similares a HERCA, más allá del contexto europeo.

## Reunión anual con los inspectores de las encomiendas de funciones

El Consejo de Seguridad Nuclear celebró el pasado 27 de octubre, mediante videoconferencia, la reunión anual con los inspectores de las nueve comunidades autónomas con las que el organismo mantiene acuerdos de encomienda de funciones (Asturias, Canarias, Cataluña, Comunidad Valenciana, Galicia, Islas Baleares, Murcia, Navarra y País Vasco). Estos acuerdos se refieren a las funciones de inspección y control de instalacio-

nes radiactivas de segunda y tercera categoría, programas de vigilancia radiológica ambiental, transporte de materiales nucleares y radiactivos, así como tribunales de licencias y asistencia en materia de emergencias. Estos encuentros facilitan la puesta en común del trabajo conjunto y permite llevar a cabo un intercambio de experiencias y opiniones en todos los aspectos que el CSN y las comunidades autónomas comparten, incluido el ámbito de la formación y la capacitación de actuación ante una emergencia en una instalación o en un transporte.

# Principales acuerdos del Pleno

## **Cambios de diseño del contenedor ENUN 52B para combustible gastado de Santa María de Garoña**

En su reunión del 25 de noviembre de 2020, celebrada mediante videoconferencia, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) informó favorablemente la solicitud para la modificación del diseño del contenedor ENUN 52B para el almacenamiento y el transporte de combustible gastado de la central nuclear de Santa María de Garoña (Burgos). La solicitud, que fue presentada por Equipos Nucleares S.A., propietaria de la central, tenía por objeto incluir un conjunto de modificaciones de diseño que requerían autorización, ya que suponían cambios que afectaban a los análisis realizados en el estudio de seguridad. El contenedor ENUN 52B es un contenedor metálico universal de doble propósito (que sirve tanto para almacenamiento como para transporte) con capacidad de albergar hasta 52 elementos. Se compone de un vaso o cuerpo metálico rodeado de un blindaje neutrónico, está provisto de dos tapas de cierre mediante pernos y su vida de diseño es de 50 años. En su interior dispone de un bastidor en el que se introduce el combustible gastado. Finalmente, la evaluación verificó que los cambios y mejoras introducidos en la revisión 3 del estudio de seguridad de dicho contenedor son aceptables.

## **Plan de pruebas de desclasificación de materiales residuales de Vandellós II**

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, reunido el 3 de diciembre de forma telemática, informó favorablemente los resultados del plan de pruebas de des-

clasificación de materiales residuales de Vandellós II (Tarragona), aunque con un conjunto de límites y condiciones. El objetivo de esta solicitud era desclasificar como materiales radiactivos determinados materiales residuales presentes en la instalación, con el fin de que estos puedan ser gestionados como residuos convencionales. Para ello, el titular ha aplicado una metodología que fue aceptada por el Consejo de Seguridad Nuclear y que incluye la ejecución y apreciación favorable por este Organismo de los resultados del plan de pruebas. La evaluación llevada a cabo verificó que los compromisos del titular adquiridos durante la inspección de febrero de 2018 se encuentran debidamente recogidos en la documentación presentada junto con el informe de resultados del plan de pruebas; que la ejecución de dicho plan de pruebas se ha ajustado a los requisitos definidos en la guía sectorial CEN-36 rev.1, aceptada por el CSN; y que los resultados del plan de pruebas son adecuados para determinar la validez de la metodología propuesta por el titular para la desclasificación de materiales residuales.

## **El Pleno aprueba el Plan Anual de Trabajo del CSN para 2021**

En su reunión del 9 de diciembre de 2020, celebrada mediante videoconferencia, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó el Plan Anual de Trabajo (PAT) de la institución para 2021, presentado por la Unidad de Planificación, Evaluación y Calidad (UPEC) en colaboración con el resto de la organización del CSN. El PAT 2021 incorpora el seguimiento de la ejecución de los objetivos estratégicos del CSN, e incluye las actividades destacadas para

este año, que ya fueron presentadas por la Secretaría General en la sesión de Pleno celebrada el 28 de octubre de 2020 y que fueron entonces acordadas por el Pleno en los términos propuestos. El Plan incluye el programa de edición de normativa; el programa de edición de procedimientos; el programa de edición de auditorías; los proyectos de I+D; las actividades internacionales, institucionales y de comunicación; los ejercicios y simulacros de emergencia; la Agenda 2030; y la planificación global de horas de trabajo.

## **Plan de Publicaciones y de Actividades de 2021**

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, reunido el 16 de diciembre vía telemática, aprobó el Plan de Publicaciones y de Actividades (Congresos y Exposiciones), correspondiente al año 2021. Lo componen un total de 36 títulos, de los cuales 14 proceden del 2020 y 5 se encuentran en proceso de edición y serán finalizados en 2021. Las distintas unidades del CSN propusieron 15 nuevos títulos para ser editados en el ejercicio 2021, y 2 son consecuencia de una actividad continuada como es el caso de la edición de guías de seguridad o instrucciones técnicas. El Pleno también acordó incorporar al Plan las publicaciones que los integrantes del grupo de trabajo han propuesto para el desarrollo del taller relativo a almacenamiento geológico profundo que se ha previsto organizar conjuntamente entre el CSN y Enresa en el año 2021, así como una indicación para que se pueda asistir de modo virtual a los congresos y exposiciones que incluyan esa modalidad.



# Publicaciones



**María Goeppert Mayer:  
de Gotinga a Premio Nobel de Física**



**Plan Estratégico del CSN 2020-2025. Español / Inglés.**



**Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado (Español / Inglés) y resumen.**

**alFa** Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

**Boletín de suscripción**

|                     |           |                    |
|---------------------|-----------|--------------------|
| Institución/Empresa |           |                    |
| Nombre              |           |                    |
| Dirección           |           |                    |
| CP                  | Localidad | Provincia          |
| Tel.                | Fax       | Correo electrónico |
| Fecha               | Firma     |                    |

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear — Servicio de Publicaciones**. Pedro Justo Dorado Delmans, 11. 28040 Madrid / Fax: 91 346 05 58 / [peticiones@csn.es](mailto:peticiones@csn.es)

La información facilitada por usted formará parte de un fichero informático con el objeto de constituir automáticamente el *Fichero de destinatarios de publicaciones institucionales del Consejo de Seguridad Nuclear*. Usted tiene derecho a acceder a sus datos personales, así como a su rectificación, corrección y/o cancelación. La cesión de datos, en su caso, se ajustará a los supuestos previstos en las disposiciones legales y reglamentarias en vigor.

# Abstracts

## REPORTS

### 6 Ions against cancer

New particle accelerators have made their way into hospitals with a view to revolutionising radiotherapy treatments and destroying tumours. However, although the results of the clinical tests performed so far are promising, the dimensions and price of such equipment make its implementation in hospitals a complicated issue.

### 12 X-rays to shed light on the intimate side of matter

The Alba synchrotron, the only one of its type in Spain, has now been in operation for ten years, during which time it has made important contributions to research in areas such as molecular biology, materials science, the environment and heritage studies. It now faces a process of remodelling in order to remain at the forefront in Europe.

### 34 The seed that germinated with the pandemic

Teleworking, a formula of secondary standing just a year ago, has become a leading option for the future thanks to covid-19, the psychological, economic, social and environmental consequences of which are only just beginning to emerge. The CSN has adapted to the new situation without any problems.

### 40 The future of 3D printing is now the present

The pandemic has allowed three-dimensional printing technology to take off definitively thanks to its applications in medicine. Furthermore, this year 3D printing has also found a way forward in the sophisticated world of nuclear reactors.

### 52 Granada on the road to nuclear fusion

The tiny municipality of Escúzar, in the province of Granada, may play a crucial role in achieving nuclear fusion. The village is the front runner in the race to house the IFMIF-DONES facility, where studies will be carried out on materials capable of withstanding the intense radiation produced by the reactions of this future energy source.

### 62 The soundtrack of the atomic era (1945-1969)

Popular American music reflects the impact on the US population of the atomic era and its evolution, from the initial euphoria after the dropping of the bombs on Hiroshima and Nagasaki to the fear that arose when the USSR developed this technology a few years later.

## RADIOGRAPHY

### 26 First intervention in the event of an incident involving radioactive material

Decalogue for response to an incident involving radioactive material: What are radioactive sources used for? What are the main principles of protection against radiation? How should one respond to an accident situation?

## INTERVIEW

### 28 Elvira Romera Gutiérrez, CSN commissioner

"The main strength of the Council lies in the overriding rigor and independence of its technical staff".

## TECHNICAL ARTICLES

### 20 Granting by the CSN of operator licences for nuclear power plants and the Juzbado nuclear fuel manufacturing facility and supervision of training for such licences

Between 2017 and 2018 the nuclear safety regulatory authorities of the EU countries with nuclear facilities carried out the first topical peer review (TPR), pursuant to the nuclear safety directive on the management of nuclear facility ageing.

### 46 The missions of the IAEA's International Physical Protection Advisory Service

The International Atomic Energy Agency set up IPPAS missions to assess the nuclear security of member States so requesting. By the end of 2019, more than 140 experts from 36 countries had carried out 90 missions in total.

# Nueva sede electrónica del CSN



El Consejo de Seguridad Nuclear ha renovado su sede electrónica para ampliar el número de trámites que se pueden realizar por medios telemáticos y facilitar su operatividad tanto a instituciones como a empresas y particulares.

Entre la veintena de trámites que están ahora disponibles mediante esta vía destacan los siguientes:

- ▶ Registro general
- ▶ Pago de tasas
- ▶ Solicitudes de acreditación para operar o dirigir instalaciones radiactivas o de radiodiagnóstico médico
- ▶ Consultas y solicitudes de información al portal de Transparencia
- ▶ Envío de ficheros y documentación
- ▶ Consulta por parte de los trabajadores expuestos de sus datos en el Banco Dosimétrico Nacional
- ▶ Denuncias radiológicas
- ▶ Solicitudes de visita al Centro de Información

<https://sede.csn.gob.es>