

En busca de los límites de la tabla periódica

El Consejo de Seguridad Nuclear renueva su red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica ambiental

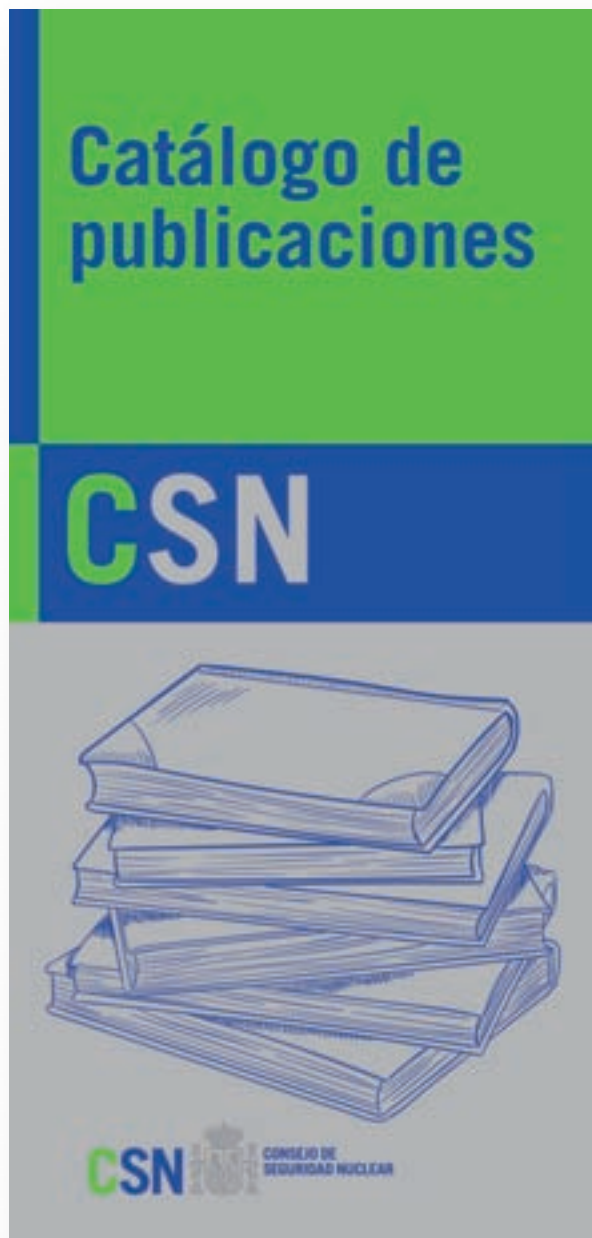
Yolanda Benito, directora general del Ciemat: “Tenemos que aprovechar todas las formas de producción de energía disponibles”

España acelera en la carrera de la supercomputación con la quinta versión del MareNostrum

Descubre todas las publicaciones del CSN

El CSN pone a tu disposición publicaciones divulgativas, guías de seguridad, informes técnicos, normativa, folletos, monografías... sobre seguridad nuclear y protección radiológica.

Descarga nuestro catálogo de publicaciones mediante este código QR:



Nuevas tecnologías

A lo largo de siete décadas, laboratorios de investigación nuclear de Estados Unidos, Rusia, Alemania y Japón han extendido el número de elementos químicos hasta el 118. Ahora intentan crear los elementos 119 y 120, con el objetivo de entender el comportamiento de la materia superdensa y saber si existe un límite que cierre la tabla periódica. Este es el tema de apertura del último número de *Alfa* de este 2022.

Además, entre los reportajes de la publicación, nos acercamos a las medidas de protección radiológica que se aplican en veterinaria, pues el uso creciente de tecnologías avanzadas en esta disciplina exige aplicar las mismas medidas de protección radiológica que en medicina para los profesionales, los animales y sus dueños.

Otro tipo de avances tecnológicos han abierto un nuevo espacio sin fronteras: el metaverso; un territorio que trasciende internet integrando las tres dimensiones. Más allá de los videojuegos y el entretenimiento, la inmersión virtual abre nuevas oportunidades de negocio en simulación, diseño, ingeniería y docencia, entre otros ámbitos.

En 2004 arrancaba el supercomputador español MareNostrum, por entonces el más potente de Europa y el tercero del mundo. La quinta versión del aparato se estrenará a mediados de 2023 y permitirá avances espectaculares en dife-

rentes áreas de investigación, como química, aeronáutica, biología molecular e incluso fusión nuclear.

Sin perder de vista la actualidad, abordamos el Tratado de No Proliferación Nuclear y la reunión mantenida el pasado agosto en Nueva York por sus países firmantes. Este acuerdo vigente desde 1970 ha vuelto al centro de la atención informativa debido a la agresión



rusa sobre Ucrania. También recorreremos los ecosistemas, que se comportan como complejos castillos de naipes donde cada especie es una carta, y cuando alguna desaparece todo el edificio se viene abajo. Para revertir esta degradación la ONU dedicó este decenio a la restauración de ecosistemas mediante la reintroducción de animales y plantas silvestres.


En Radiografía, mostramos el SISC,

el método que el Consejo de Seguridad Nuclear y los operadores de las centrales nucleares emplean para supervisar de manera rápida el funcionamiento de las instalaciones y determinar las acciones correctoras necesarias.

La entrevista de este número está protagonizada por la directora general del Ciemat, Yolanda Benito, quien aboga por emplear todas las fuentes de energía que tenemos disponibles en estos momentos complejos que vivimos.

La parte más técnica de *Alfa* muestra el proceso de evaluación y licenciamiento por parte del CSN de los almacenes temporales individuales en los que albergar el combustible gastado de las centrales nucleares así como los contenedores en los que se aloja.

Cerramos el último número del año con la presentación de la nueva red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica gestionada por el Consejo y que está compuesta por 185 estaciones distribuidas por todo el territorio nacional y quince estaciones portátiles, que introducen numerosas ventajas sobre los aparatos de la antigua red, que estuvo 20 años en operación.

Además de presentar los contenidos de *Alfa* 52, el comité editorial de la revista quiere aprovechar estas líneas para deseáros un 2023 cargado de noticias favorables y energía positiva. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 52
Diciembre 2022



Comité Editorial

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

Comité de Redacción

J. Pedro Marfil Medina
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, iStock.

Impresión

Editorial MIC
C/Artesiano s/n
Pol. Ind. Trobajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada

Interior del acelerador de iones
de Darmstadt. / A. Zschau - GSI
Helmholtz center for heavy ion
research

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 nece-
sariamente.

REPORTAJES

6 En busca de los límites de la tabla periódica

A lo largo de siete décadas, laboratorios de investigación nuclear de EE.UU., Rusia, Alemania y Japón han extendido el número de elementos químicos hasta el 118. Ahora intentan crear los elementos 119 y 120, con el objetivo de entender el comportamiento de la materia super densa y saber si existe un límite que cierre la tabla periódica.

12 Seguridad radiológica en veterinaria

Los animales de compañía son considerados cada vez más como miembros de la familia y sus dueños solicitan cuidados de su salud equiparables a los de la medicina. El uso creciente de tecnologías avanzadas en veterinaria exige aplicar las mismas medidas de protección radiológica para los profesionales, los animales y sus dueños.

33 España acelera en la carrera de la supercomputación

En 2004 arrancaba el supercomputador español MareNostrum, por entonces el más potente de Europa y el tercero del mundo. La quinta versión del aparato se estrenará a mediados de 2023 y permitirá avances espectaculares en diferentes áreas de investigación, como química, aeronáutica, biología molecular e incluso fusión nuclear.

39 El Tratado de No Proliferación de armas nucleares

La agresión rusa sobre Ucrania y la amenaza de utilizar armas nucleares han devuelto al centro de la actualidad de 2022 el problema de la proliferación nuclear y el tratado que lo controla. La reunión de los países firmantes celebrada en agosto en Nueva York no ha conseguido sus objetivos más ambiciosos.

52 Reintroducción y traslocación de especies para restaurar ecosistemas degradados

Los ecosistemas se comportan como complejos castillos de naipes donde cada especie es una carta, y cuando alguna desaparece todo el edificio se viene abajo. Para revertir esta degradación la ONU dedicó este decenio a la restauración de ecosistemas mediante la reintroducción de animales y plantas silvestres.

58 Metaverso, la tecnología del siglo XXI

Los avances tecnológicos han abierto un nuevo espacio sin fronteras: el metaverso; un territorio que trasciende internet integrando las tres dimensiones. Más allá de los videojuegos y el entretenimiento, la inmersión virtual abre nuevas oportunidades de negocio en simulación, diseño, ingeniería y docencia, entre otros ámbitos.



RADIOGRAFÍA

26 Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC)

Para supervisar de manera rápida el funcionamiento de las centrales nucleares y determinar las acciones correctoras necesarias, el Consejo de Seguridad Nuclear y los titulares de las instalaciones utilizan el sistema SISC, que proporciona esa información siguiendo procedimientos establecidos.

ENTREVISTA

28 Yolanda Benito, directora general del Ciemat

“En estos momentos complicados tenemos que aprovechar todas las fuentes de energía disponibles”

ARTÍCULOS TÉCNICOS

17 Situación actual del almacenamiento temporal en seco del combustible gastado en contenedores

En España hay seis instalaciones temporales individualizadas de almacenamiento en seco del combustible nuclear gastado y se prevé la construcción de otras dos. El Consejo de Seguridad Nuclear somete a un estricto proceso de evaluación y licenciamiento instalaciones y contenedores para garantizar su seguridad.

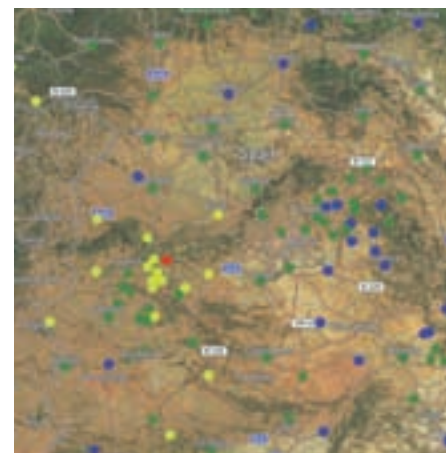
44 La nueva red de estaciones automáticas del Consejo de Seguridad Nuclear

En 2021 se completó la instalación de la nueva red de estaciones automáticas de vigilancia radiológica, compuesta por 185 estaciones distribuidas por todo el territorio nacional y 15 estaciones portátiles, que introducen numerosas ventajas sobre los aparatos de la antigua red, que estuvo 20 años en operación.

dora)	degradado	múlt repe
ancos	1 amarillo (3 blancos)	Rojo ama o degr cont
ie	Análisis de causa raíz	Análisis raíz ev



ENRIQUE DE LA FUENTE / CIEMAT



63 **Reacción en cadena**

67 **Panorama**

69 **Acuerdos del Pleno**

70 **Publicaciones**

71 **Abstracts**

Laboratorio donde se generan los iones que serán acelerados para impactar en el blanco en el GSI de Darmstadt.

J. HOSAN - GSI HELMHOLTZCENTRUM FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG GMBH

Los científicos intentan producir los elementos 119 y 120 en laboratorio

En busca de los límites de la tabla periódica

La tabla periódica de los elementos es la piedra clave de toda una disciplina, la química, ya que permite poner orden en el maremágnum de elementos, cada uno con sus propias características físicas y químicas. Aunque hubo otras aproximaciones, se reconoce la autoría de la tabla vigente al químico ruso Dimitri Mendeleiev, que la construyó para dar cabida a los 60 elementos químicos conocidos por entonces, hacia 1869. Hoy la cifra se ha extendido

hasta los 118, casi el doble, y diversos laboratorios de Estados Unidos, Rusia, Alemania y Japón intentan extenderla aún más creando en sus instalaciones los que llevarán los números 119 y 120. Es una aventura de ciencia básica, para entender el comportamiento de la materia super densa y también para llegar a saber si existe un final, un límite inaccesible que cierre la tabla.

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■

Yuri Oganessian es un físico ruso de origen armenio de 89 años que, al menos hasta el año pasado (en 2022 es difícil saber qué ocurre en Rusia), seguía yendo cotidianamente a trabajar en el Laboratorio Flerov de Reacciones Nucleares de Dubna, población situada a poco más de cien kilómetros al norte de Moscú. Aunque no ha sido galardonado con el premio Nobel asegura que prefiere el inmenso honor que ha recibido en vida: dar su nombre al elemento 118 de la tabla periódica, el oganesón, el más pesado de todos los conocidos. Según dijo en 2016, cuando la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) decidió dar nombre a los últimos elementos incorporados a la lista, los premios Nobel te dan fama y reconocimiento, pero con los años ese fulgor va menguando hasta desaparecer; pero estar en la tabla periódica es un honor que perdurará a través de los siglos.

Las normas no escritas, pero respetadas, sobre la concesión de nombres de los nuevos elementos por la IUPAC indican que se otorguen solo a científicos ya fallecidos, pero en el caso de Oganessian se pretendía compensar el nombramiento del elemento 106, seaborgio, concedido

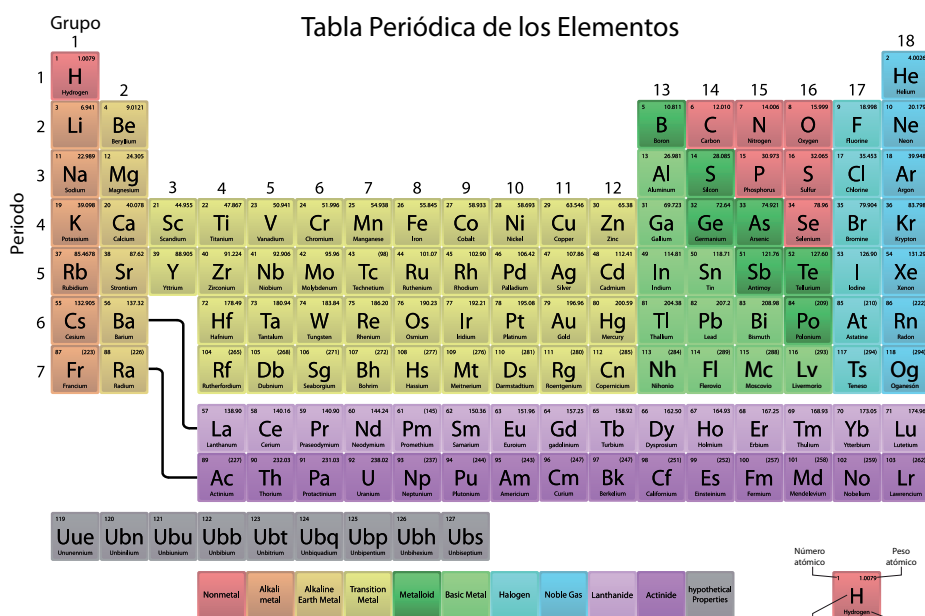
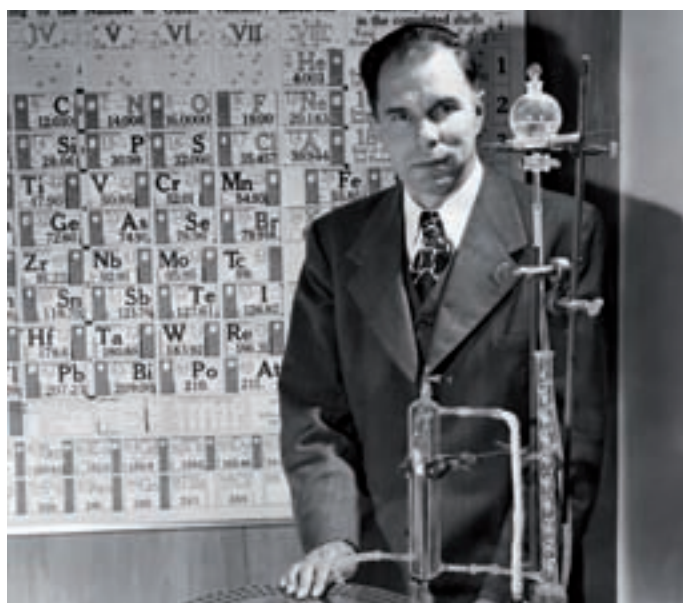
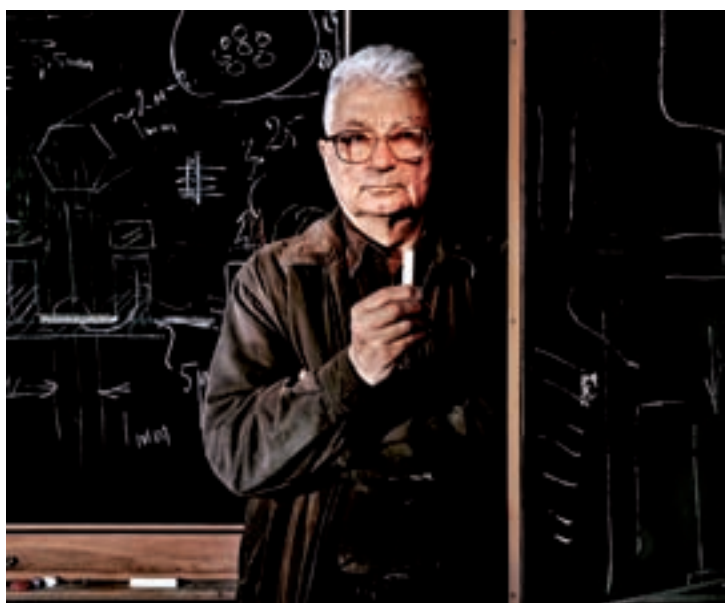


Tabla periódica actualizada y ampliada.

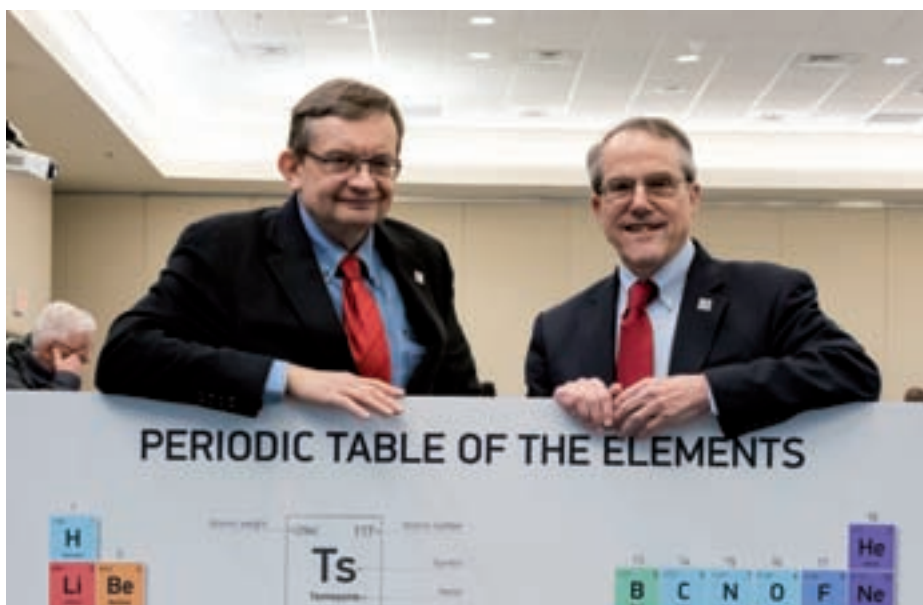
en 1974 en honor del norteamericano Glenn Seaborg, cinco años antes de su fallecimiento. En los dos casos sus merecimientos eran semejantes: entre ambos contribuyeron a colocar en la tabla periódica 16 nuevos elementos, de los 26 que se han incorporado tras ser generados en laboratorio (27 si incluimos el tecnecio, el número 43 de la tabla), desde que Seaborg, quien sí obtuvo además el Nobel

de Química, sintetizó por primera vez el plutonio, allá por 1940.

Aunque la tabla periódica creada por el ruso Mendeleiev en poco se parece a la actual, le sigue dando nombre porque tuvo la genial idea de entender que había que ordenar los elementos conocidos de acuerdo con el doble criterio de su masa y sus propiedades, aunque quedasen casillas vacías, que atribuyó a elementos aún



Yuri Oganessian (izquierda) y Glenn Seaborg.



Krzysztof Rykaczewski (izquierda) y Jim Roberto, en el Oak Ridge National Laboratory.

desconocidos. Todas esas casillas, e incluso una nueva columna entera, la de los gases nobles, se fueron rellenando hasta los años 30 del siglo pasado. Por entonces, el uranio era el elemento conocido más pesado, pero ya se sospechaba que se podían crear nuevos elementos, los transuránicos, bombardeando uranio con neutrones y con partículas alfa. Así se consiguió, en Berkeley, el plutonio y el neptunio.

De competición a colaboración

En los años 40 y 50 se siguieron sumando nuevos elementos. La clave para su consecución era el uso del ciclotrón, un tipo de acelerador de partículas inventado

por el químico Ernest Lawrence, de la Universidad de Berkeley. Por eso allí se sintetizaron muchos de ellos, de la mano del propio Lawrence, junto a Seaborg, Albert Ghiorso y otros científicos. La idea era acelerar iones de átomos ligeros hasta velocidades cercanas a la de la luz para hacerlos impactar sobre blancos formados por elementos pesados, primero uranio, luego plutonio, americio... y confiar en que en algunas ocasiones el impacto provocara la fusión de los núcleos de ambos elementos y se formaran los nuevos elementos. No es una reacción sencilla, ya que la mayor parte de las colisiones alteran la trayectoria de los iones



Christoph Düllmann.

o desplazan los átomos del objetivo. De hecho, los iones acelerados forman un chorro de aproximadamente un billón de núcleos por segundo y rara vez consiguen fusionarse. Los experimentos se prolongan durante varios días y los éxitos se producen con extremada lentitud. De media, entre el descubrimiento de un nuevo elemento y otro transcurren entre tres y cinco años.

Mediados los años 50, la rivalidad entre Estados Unidos y la Unión Soviética hizo acto de presencia también en este terreno y los soviéticos consiguieron adelantarse en la carrera con el descubrimiento de nuevos elementos en los laboratorios de Dubna. A finales de los años setenta apareció un tercer competidor en Darmstadt (Alemania), el Centro Helmholtz para la Investigación de Iones Pesados (GSI,

La isla del tesoro

Todo colectivo tiene sus leyendas y su santo grial. El de la comunidad de creadores de nuevos elementos es la llamada "isla de estabilidad", un supuesto paraíso formado por algunos elementos capaces de sobrevivir por un periodo lo bastante largo como para poder ser utilizados para alguna aplicación práctica. Aunque no es una regla lineal, a medida que se avanza en la lista de elementos superpesados son cada vez más inestables, desintegrándose en apenas una fracción de milisegundo.

A pesar de esa creciente inestabilidad, la teoría indica que ciertas configuraciones del núcleo atómico deberían incrementar su duración. Hace 30 años se pensaba que la isla estaría en torno al elemento 114 (flerovio) o 115 (moscovio), de acuerdo con una predicción realizada por Glenn Seaborg. La idea es que cierto número de nucleones (protones y neutrones) puede formar una esfera perfecta, lo que le daría estabilidad. De hecho, cuando en 1999 se dio a conocer el elemento 114 se indicó que su vida era de 30 segundos. Puede parecer una existencia muy breve, pero es miles de veces mayor que la de los elementos 111 y 112, que apenas sobreviven menos de un milisegundo.

por sus siglas en alemán), que se apuntó media docena de éxitos durante los ochenta y noventa. Los últimos elementos añadidos fueron fruto de la colaboración internacional surgida tras el fin de la Guerra Fría. Desde finales de los 90, los laboratorios rusos de Dubna realizaban los experimentos en sus potentes aceleradores y Estados Unidos aportaba los elementos utilizados, generados en sus laboratorios Lawrence Livermore y Oak Ridge.

“En los 90 se desarrolló un nuevo método denominado fusión caliente, usando como proyectil calcio-48 sobre objetivos hechos con actínidos, lo que permitió el descubrimiento de los elementos 114 a 118. Pero para ir más allá se necesitan proyectiles más pesados que el calcio-48, ya que el californio es el elemento diana más pesado que podemos producir en cantidades suficientes”, dice Krzysztof Rykaczewski, investigador senior del Oak Ridge National Laboratory (ORNL) estadounidense.

Cada nuevo elemento tiene un protón más que el anterior, por lo que es necesario que los elementos usados como proyectiles o los empleados como diana suban un escalón para que el resultado sea el buscado. Manteniendo como proyectil el calcio-48 se consiguieron el 114 (usando plutonio como diana), el 115 (con americio), el 116 (con curio), el 117 (con berkelio) y el 118 (con californio).

Tabla 1 Elementos transuránicos

Número atómico	Nombre	Símbolo	Año	Lugar
93	Neptunio	Np	1940	EE.UU.
94	Plutonio	Pu	1940	EE.UU.
95	Americio	Am	1945	EE.UU.
96	Curio	Cm	1944	EE.UU.
97	Berkelio	Bk	1949	EE.UU.
98	Californio	Cf	1950	EE.UU.
99	Einsteinio	Es	1952	EE.UU.
100	Fermio	Fm	1953	EE.UU.
101	Mendelevio	Md	1955	EE.UU.
102	Nobelio	No	1958	Rusia
103	Laurencio	Lr	1961	EE.UU.
104	Rutherfordio	Rf	1964	Rusia
105	Dubnio	Db	1968	Rusia
106	Seaborgio	Sg	1974	Rusia - EE.UU. (por separado)
107	Bohrio	Bh	1981	Alemania
108	Hassio	Hs	1984	Alemania
109	Meitnerio	Mt	1982	Alemania
110	Darmstadio	Ds	1994	Alemania
111	Roentgenio	Rg	1994	Alemania
112	Copernicio	Cn	1996	Alemania
113	Nihonio	Nh	2015	Japón
114	Flerovio	Fl	1999	Rusia
115	Moscovio	Mc	2003	Rusia/EE.UU. (colaboración)
116	Livermorio	Lv	2000	Rusia
117	Teneso	Ts	2010	Rusia/EE.UU. (colaboración)
118	Oganesón	Og	2005	Rusia/EE.UU. (colaboración)

El oganesón fue generado en 2002 (reconocido por la IUPAC en 2006) y aunque hubo dos elementos posteriores, el 117 (teneso) en 2010 y el 113 (nihonio,

generado en 2015 en el laboratorio RIKEN de Japón), la búsqueda del 119 y posteriores parece haber sufrido un prolongado parón. Tras algún intento inicial llevado

Según Krzysztof Rykaczewski, “el tiempo de vida del flerovio (114) muestra un incremento significativo, ya que permite realizar experimentos de química con un elemento superpesado”.

Actualmente, se espera encontrar la isla en torno a los elementos 120, 124 y 126. “El problema no es el elemento, es decir el número de protones, sino el número de neutrones. Los isótopos que hemos podido generar del 114 no tienen suficiente número de estos. Hemos conseguido cinco isótopos del 114 y los que tienen más neutrones son más estables que los otros. No sabemos donde está el centro de la isla, pero el concepto es correcto”, dice Christoph Düllmann.

De hecho, el número mágico de neutrones que los expertos consideran proporcionaría la ansiada estabilidad es 184. Una cifra muy difícil de conseguir con los elementos actualmente producidos pero que sería accesible con el elemento 126. Algunos cálculos indican que la vida media de un isótopo con 310 nucleones podría ser de millones de años. Eso nos proporcionaría un material superpesado (un 50 % más que el plomo) y sorprendente. Un auténtico tesoro, aunque las limitaciones para fabricarlo en grandes cantidades restringirían sus aplicaciones. ▶

a cabo en 2007 en Darmstadt, la búsqueda del 119 arrancó en 2017 pero diversas circunstancias han frenado los experimentos. Unas de índole global y otras derivadas de las dificultades inherentes al propio proceso. Según Christoph Düllmann, responsable del Departamento de Química del GSI de Darmstadt “Evidentemente, la pandemia afectó a nuestra área, pero no ha habido una ruptura en la investigación sobre elementos superpesados. Desde luego, debido a la prohibición de la presencialidad, la actividad de los aceleradores de los principales centros se interrumpió”. La situación geopolítica creada tras la invasión de Ucrania por Rusia también tiene consecuencias. Según Jim Roberto, antiguo director asociado del ORNL, durante años “hemos colaborado tanto con Dubna como con RIKEN. Mantenemos la colaboración con los japoneses, pero la colaboración para conseguir el 120 con Rusia está suspendida, tanto por cuestiones técnicas como por otras razones”, en velada alusión a la guerra en Ucrania.

Y entre las dificultades del propio proceso de generación del 119 y el 120, el principal es encontrar los elementos adecuados. “Los últimos elementos fueron hechos con calcio, que tiene 20 protones. Aunque aún no comprendemos muy bien cómo se producen las reacciones con estos iones, el calcio ha funcionado muy bien. El 118 utilizó como diana californio, que es el elemento más pesado del que se pueden obtener suficientes cantidades actualmente. Para ir más allá del 118 se necesitaría usar como diana einstenio y fermio, que no se pueden producir en cantidades suficientes”, explica Düllmann. Además, se desintegran con rapidez, 20 días de periodo de semidesintegración el primero y entre 20 y 30 minutos el segundo (dependiendo del isótopo). Y a medida que se avanza en la tabla cada nuevo elemento es mucho más inestable.

Si la diana no puede ser el siguiente elemento más pesado, la idea es cambiar

el proyectil. “La cuestión es que no está claro cuál es el idóneo. Podría ser titanio o cromo, con una diana más ligera, o incluso níquel. La estrategia más adecuada aún no está clara, y las investigaciones para determinarlo llevarán bastante tiempo, dice Düllmann, que se muestra convencido de que se conseguirá el objetivo, aunque rehúsa estimar un plazo.

Según Jim Roberto, “Dubna y RIKEN han desarrollado nuevas instalaciones para incrementar las corrientes del haz de proyectiles. Los japoneses están intentando producir el elemento 119 con vanadio-51 y curio-248, pero aún no se ha observado ningún evento. Dubna inició los experimentos para lograr el 120 pero encontraron problemas de contaminación en la diana. Este material, generado en el ORNL, ha sido reprocesado pero los experimentos no se han reanudado. El éxito de este abordaje requiere una corriente estable de titanio-50 como proyectil, cuya eficacia aún no se ha demostrado”.

Por su parte, Darmstadt parece haber abandonado la carrera. Según Michael Block, responsable del Departamento de Física del GSI, “no podemos dedicar doce meses al año para intentar obtener algún resultado para conseguir añadir un protón a un núcleo. No es el foco de nuestra actividad científica. Creo que es mucho más interesante añadir neutrones a elementos superpesados ya conocidos”. Frente al honor de aparecer como el ganador de la carrera, de escaso valor científico en sí mismo, los alemanes prefieren estudiar a fondo las propiedades de algunos de estos superelementos ya conquistados. Así, han generado nuevos átomos de flerovio, el elemento 114, y han determinado, entre otras cosas, que se trata del metal más volátil, según han dado a conocer en septiembre de 2022 en la revista *Frontiers in Chemistry*,

Extender un peldaño la tabla periódica requiere grandes sumas de dinero y la dedicación y esfuerzo de grupos nu-

merosos de científicos trabajando durante varios años. Los átomos obtenidos de los nuevos elementos son cada vez menos numerosos (a veces apenas tres o cuatro), desaparecen de forma casi instantánea y aunque no lo hagan no se pueden producir cantidades suficientes como para ser utilizados en ninguna aplicación práctica. ¿Vale la pena el esfuerzo? Para Block la cuestión no ofrece dudas, al menos desde el punto de vista de ciencia básica: “Investigar las propiedades de



Michael Block.

estos elementos es interesante porque son muy diferentes a los elementos conocidos. Tienen diferentes propiedades nucleares y químicas y queremos saber cómo se comportan”.

Los confines de la tabla

Una pregunta que los científicos se han hecho desde hace décadas es si hay un límite para la creación de nuevos elementos, más allá del cual sea imposible avanzar. Desde un punto de vista teórico simple, siempre será posible concebir un núcleo que tenga un protón más que el anterior. Por un lado, existen problemas técnicos. Como ya se ha dicho, cada nuevo elemento exige utilizar elementos más pesados y la producción de algunos de ellos es complicada. Además, usar como proyectiles iones más pesados supone incrementar la energía necesaria para

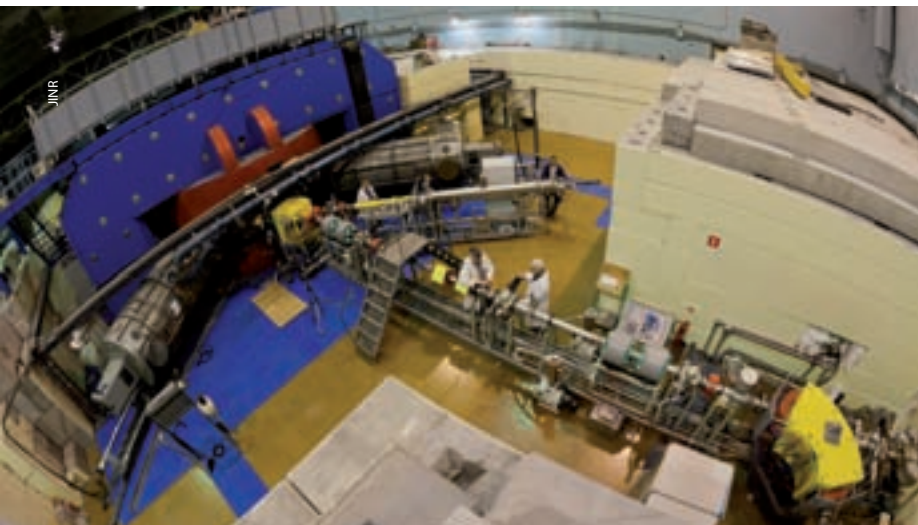
acelerarlos hasta la velocidad adecuada, en torno a una décima parte de la velocidad de la luz, y a partir de cierta masa esa energía no está al alcance de los ciclotrones utilizados. De ahí que Dubna haya construido uno nuevo. Cada paso incrementa las dificultades.

Y luego están los límites impuestos por las propias leyes de la naturaleza, que no dependen ya de nuestra capacidad para construir mejores aparatos y fabricar átomos a voluntad. El célebre

periodo. Con él sería necesario abrir un hueco nuevo también en las columnas a partir del elemento 122. No hay que olvidar que, aunque los elementos 58 a 71 (los lantánidos) y 90 a 103 (los actínidos) se suelen colocar fuera de la tabla para no extenderla horizontalmente en exceso, en realidad deberían ocupar columnas inexistentes para los periodos uno al cinco. De semejante manera, para albergar los elementos 122 al 138 deberían abrirse nuevas columnas. Y se inauguraría tam-

refiriéndose sobre todo al 122 y posteriores. Este fenómeno se produce ya con algunos actínidos y lantánidos, que no se comportan de manera semejante a pesar de estar en la misma columna, por la mezcla de sus diferentes orbitales. Así, según Block, “el elemento 118 está en la columna de los gases nobles, pero no está claro que se comporte como ellos”.

La carrera no ha hecho más que empezar y de momento tiene dos corredores, el equipo japonés del laboratorio Riken,



A la izquierda, acelerador U400 del Joint International Nuclear Research de Dubna (Rusia). A la derecha, manipulando átomos de californio-252 en Oak Ridge.

físico Richard Feynmann calculó en su día que el límite debía estar en torno al elemento 137, debido a los efectos relativistas. A medida que los núcleos se hacen más grandes, los electrones que los circundan deben moverse a mayores velocidades y a partir de cierto punto deberían moverse muy cerca del límite absoluto, la velocidad de la luz. Además, en ese rango los electrones incrementarían su masa de forma desorbitada. “El límite actualmente se sitúa más bien en torno al 174, pero es improbable que se pueda alcanzar y que semejante núcleo pueda vivir lo suficiente para llegar a ser un átomo”, dice Michael Block

Un misterio añadido a la consecución del elemento 119 es que inaugurará una nueva línea en la tabla periódica, el octavo

bién un nuevo orbital, el g, para los electrones. Los científicos no están seguros de que sus propiedades sean semejantes a las de otros elementos más ligeros de su misma columna. “No se sabe si se extenderá la ley periódica o se modificará y esta es una de las motivaciones importantes para realizar este trabajo. De acuerdo con nuestro actual conocimiento, el 119 inaugurará probablemente una nueva serie, que tendrá que recibir un nombre, como ocurre con los lantánidos y actínidos”, dice Rykaczewski

“Es extremadamente difícil predecir qué ocurrirá; no está claro cómo interactuarán los diferentes orbitales. Incluso puede que ya no podamos llamar periódicos a estos elementos, porque su periodicidad se habrá perdido” dice Düllmann,

el más reciente competidor, y el ruso de Dubna, que dedica a ese esfuerzo su nuevo y más potente ciclotrón, el DC-280, inaugurado en 2019, capaz de acelerar chorros de 60 billones de iones por segundo. Rota o suspendida la colaboración entre Rusia y Estados Unidos, quizás los americanos pongan en marcha ahora su propio proyecto. Y el GSI alemán prefiere, de momento, centrarse en el estudio más a fondo de los superpesados ya conocidos. En cualquier caso, la carrera será de larga distancia y quizás no se consigan resultados hasta finales de la década o más tarde, tanto por las dificultades técnicas como por los efectos de las crisis sanitaria, geopolítica y económica actuales. Pero nadie parece dudar de que los elementos 119 y 120 serán finalmente descubiertos. ©



El creciente uso de técnicas sanitarias avanzadas con animales exige una formación adecuada en protección de los profesionales

Seguridad radiológica en veterinaria

La relación con los animales de compañía ha cambiado con el tiempo. Este vínculo se traduce en un mayor cuidado de estos compañeros cada vez más numerosos. Los dueños de mascotas se comportan de una manera similar al de las personas que van con su prole al pediatra y demandan al veterinario diagnósticos y tratamientos altamente especializados. Ahora, los animales son ya parte de la familia y sus dueños piden que

tengan la misma calidad terapéutica que un humano. Y la práctica veterinaria ha avanzado para adaptarse a esta demanda, incorporando los avances tecnológicos que se producen en el ámbito de la medicina. Y eso supone que deben atender las exigencias que esas tecnologías conllevan; por ejemplo, en cuanto a protección radiológica se refiere.

■ Texto: **Pura C. Roy** | periodista de ciencia ■

Las clínicas veterinarias han sufrido transformaciones tecnológicas que les permiten tratar desde un hámster a un caballo y utilizar desde la radiografía analógica, hasta la radiología digital directa para ver la imagen inme-

diatamente después de realizar la prueba. También disponen de ecógrafos con los que diagnosticar masas abdominales de milímetros y en las clínicas se realizan tomografías y resonancias. Cada una de estas tecnologías necesita ser manipu-

lada por los veterinarios con responsabilidad y conocimientos, especialmente cuando utilizan radiaciones.

En medicina y cada vez más en veterinaria, el uso de radiaciones ionizantes se encuadra en la aplicación de téc-

nicas de radiodiagnóstico, radioterapia y medicina nuclear. Según el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) el radiodiagnóstico comprende el conjunto de procedimientos de visualización y exploración de la anatomía mediante imágenes y mapas. Algunas de estas aplicaciones son la obtención de radiografías mediante rayos X para identificar lesiones y enfermedades internas, el uso de radioisótopos en la tomografía computarizada para generar imágenes tridimensionales, la fluoroscopia y la radiología intervencionista, que permite el seguimiento visual de determinados procedimientos quirúrgicos.

La medicina nuclear es una especialidad médica que incluye la utilización de material radiactivo en forma no encapsulada para diagnóstico, tratamiento e investigación. Un ejemplo es el radioinmunoanálisis, una técnica analítica de laboratorio que se utiliza para medir la cantidad y concentración de numerosas sustancias en muestras biológicas del paciente. Por su parte, la radioterapia permite destruir células y tejidos tumorales aplicándoles altas dosis de radiación. Y dado que los animales caseros cada vez viven más, las enfermedades que hace años eran muy escasas, como las oncológicas, ahora son mucho más frecuentes.

Pruebas radiológicas

Como ocurre en la salud humana, uno de los métodos utilizados en veterinaria son las pruebas radiológicas. Por ello recientemente la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) ha incorporado en su página web un extenso borrador de una nueva publicación sobre protección radiológica en la práctica veterinaria para ser sometido a comentarios. El motivo de este documento, que no es normativo, es poner en evidencia la importancia del uso actual de las radiaciones ionizantes en su práctica cotidiana.

“El uso de las radiaciones ionizantes en aplicaciones veterinarias, tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de enfermedades ha crecido exponencialmente en los últimos años, de forma paralela a como lo ha hecho la preocupación por la protección radiológica de los profesionales que se dedican a ello, así como de los miembros del público en su faceta de propietarios de los animales sometidos a estos procedimientos”, explica el borrador de la ICRP.

El sistema de protección radiológica aplicado a las instalaciones veterinarias está descrito en numerosas publicaciones internacionales, como el informe Radiation Protection and Safety in Veterinary Medicine (International Atomic Energy Agency, 2021. IAEA safety reports series), por citar una de las más recientes. También la Asociación HERCA (Heads of the European Regulatory Competent Authorities in Radiation Protection) ha publicado varias recomendaciones.

María Luisa Tormo, técnico del Área de Servicios en Protección Radiológica del CSN, explica que “en veterinaria se utiliza la radiología igual que

en la clínica humana, para diagnosticar y tratar enfermedades. Se emplea radiología, medicina nuclear y radioterapia. Pero lo fundamental es conseguir que los veterinarios se expongan a las radiaciones lo menos posible. Pueden estar expuestos tanto en la investigación como en la práctica diaria en sus clínicas y en espacios abiertos. En veterinaria, además de la irradiación que afecta al propio animal y al profesional (exposición ocupacional) también hay que tener en cuenta a los propietarios de los animales, porque en algunas situaciones tienen que participar en la inmovilización del animal”.

Para esta especialista, hay otra diferencia fundamental: mientras que en medicina humana el profesional es altamente especializado, en veterinaria suelen ser más generalistas y estas herramientas diagnósticas o terapéuticas son solo una parte de las posibilidades que tiene el veterinario a su alcance. Por eso es importante que adquieran suficiente conciencia sobre el posible riesgo que conlleva el uso de las radiaciones, algo que ha adquirido un radiólogo en el ámbito de la medicina



Posicionamiento de cadera de un perro para evaluar displasia.

humana, que solo se dedica a ello. “Los veterinarios, en general, sabemos poco de las radiaciones ionizantes más allá de que sirven para diagnosticar y tratar enfermedades y que hay que tener cuidado con ellas. La formación sobre protección radiológica durante la carrera no es muy amplia, aunque un veterinario necesita de esta formación para obtener la acreditación para dirigir una instalación de radiodiagnóstico. Y sin embargo, las condiciones en que se utilizan las radiaciones en la práctica veterinaria: necesidad de sujetar al animal, equipos menos avanzados tecnológicamente y exploraciones en campo sin la protección que ofrecen los blindajes estructurales, pueden suponer un riesgo adicional al existente en la medicina humana”, explica Tormo.

Ante esta situación esta especialista piensa que fomentar la cultura de la seguridad es muy importante, así como tener bien reconocido el riesgo que va a comportar. “A pesar de haber adquirido la acreditación, al ser esta para siempre es aconsejable una formación continuada”.

De la misma opinión es María Isabel García Real, profesora de Radiología y Diagnóstico por Imagen del Departamento de Medicina y Cirugía Animal de la Facultad de Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid. “La formación en la universidad es muy general, básicamente es de principios y de interpretación radiológica. Además, hoy día tenemos que enseñar diversas técnicas de imagen. En el currículo que compartimos, que es cuatrimestral, hay que incluir la ecografía, la tomografía computarizada y la resonancia magnética. Pero además de enseñar como se toma la imagen, enseñamos los elementos de protección. Dentro de esta formación, sí se les inculca a los alumnos que para utilizar rayos X tienen que realizar cursos que les capacite como operadores. Pero es habi-

tual que no todos los veterinarios cuentan con estos cursos. En una clínica convencional lo normal es que una o dos personas los tengan, cuando deberían tenerlos todos los que trabajan en esos centros”.

Por ello, el Colegio Oficial de Veterinarios de Madrid, al igual que los de otras comunidades, ofrece el curso de interpretación radiológica en animales, con objeto de complementar los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria y que el veterinario esté preparado para identificar los casos clínicos más complejos mediante el uso de la radiografía, una herramienta fundamental en su día a día.

La radiografía como técnica de diagnóstico ha sido y seguirá siendo imprescindible en veterinaria ya que permite una aproximación diagnóstica de un gran número de pacientes y de enfermedades. El revelado manual se ha practicado en muchas clínicas, pero la evolución de las técnicas, tanto de imagen como de terapias, en los últimos años en veterinaria indica que seguirán las tendencias de la medicina humana, cada vez más complejas y con mayor demanda. A medida que se instalen más equipos avanzados en las clínicas veterinarias, su utilización irá consecuentemente en aumento.



Generalmente el veterinario tiene que sujetar a los animales, por ello los programas de protección radiológica contienen una cantidad de medidas para su seguridad, desde el administrativo, el diseño de las instalaciones, así como el vestuario recomendado: delantales plomados, guantes, gafas, collares de cuello para el tiroideo y aparatos de dosimetría. “Los animales enfermos conllevan un riesgo, están agitados, expuestos a la adrenalina y a la defensa, lo más normal es que no colaboren. Así que se aumenta la dificultad de obtener una buena imagen por el movimiento del animal y se suceden las repeticiones. Por eso es importante mentalizar a los veterinarios de los riesgos a las sucesivas exposiciones”, explica Tormo.



Pruebas radiológicas realizadas en animales del Ocenogràfic de Valencia.

Pruebas más caras

“El aumento de la concienciación por el bienestar de los animales de compañía ha provocado que los propietarios inviertan más en la salud de sus mascotas e incluso que se decidan a tratar casos complejos como el temido cáncer canino y a pedir pruebas más caras que una radiografía, como son los TAC, a pesar de que los precios oscilan entre 300 y 500 euros la prueba. Los aparatos tampoco son baratos. La mayoría de las clínicas disponen de equipos de rayos X, muchos de ellos con sistemas de digitalización de imagen, cuyos precios oscilan entre los 12.000 y los 40.000 euros los más sofisticados, un material que el profesional debe saber manejar con pericia para ofrecer un buen servicio y aprovechar los recursos”, asegura García Real.

Ante estos precios es habitual comprar equipos de segunda mano. “Estos aparatos se rigen por la mismas normas que los de primera mano y tienen que registrarse en los departamentos de in-

dustria de las comunidades autónomas. Si son radiactivos, además hay que darlos de alta y someterlos al control regulador del CSN. Las exposiciones de los animales a la radiación, no se consideran médicas, así que por ahora en España no se aplican las mismas normas en veterinaria que en medicina, aunque sí se tiene que cumplir con las dosis requeridas por los reglamentos. El

uso en humanos está regulado por un Real Decreto específico que determina la justificación y la utilización de las exposiciones médicas. Los animales no se consideran pacientes como tales, sino una propiedad que, a efectos legales, casi es como un mueble. Pero el Código Civil se ha modificado recientemente para considerarlos seres vivos sensibles, así que los juristas tendrán que analizar y actuar teniendo en consecuencia”, aclara Tormo.

El CSN realiza inspecciones para detectar y controlar las posibles desviaciones administrativas y técnicas, para que sean solventadas si es necesario. Estas herramientas no deberían ser un peligro ni para la salud de los animales ni para los humanos. Nadie duda que las nuevas tecnologías facilitan el trabajo. Así, las ecografías, sobre todo de abdomen, tejidos blandos del cuello o la valoración del estado del corazón, son fundamentales y han eliminado muchas radiografías. En los últimos años las clínicas medias y grandes han incorporado además el TAC.

“Las nuevas tecnologías de imagen y la digitalización repercuten en una mayor calidad, ayudan a reducir las dosis requeridas y facilitan la obtención de buenas imágenes frente a las analógicas, pero a pesar de todo hay que seguir optimizando los usos, hacerlo con la menor dosis posible”, matiza García Real. “Me preocupa que, con la incorporación de las nuevas tecnologías, el veterinario se olvide de la radiografía, que tiene una menor exposición a la radiación, y la sustituya por el TAC sin una formación adecuada. A mis alumnos les digo que un TAC equivale a 500 radiografías y se asustan, pero tienen que comprender que no todo lo que se hace con radiografías se debe hacer con un TAC. Igual que en la humana, siempre hay que optar por la tecnología menos perjudicial para todos y que te permita obtener la información necesaria para el tratamiento”.

El Organismo Internacional de Energía Atómica tiene documentos específicos destinados a los veterinarios, tanto para los que prescriben como los que realizan las pruebas, para que justifiquen las exploraciones en el mismo sentido que se hace con las humanas, resaltando que tienen que aportar más beneficio que daño, que hay que implicar al menor número posible de personas, utilizar las menores dosis posibles sin comprometer la prueba veterinaria y optimizar las dosis para obtener la mejor calidad de la imagen. Pero se trata de recomendaciones, no de normas obligatorias, lo que conlleva muchas veces cuestiones éticas en su uso y a preguntarse cosas como si es necesario utilizar radioterapia en un perro de catorce años de edad.

Las terapias y exploraciones con radiofármacos en veterinaria también llevan asociadas medidas de protección radiológica, dirigidas a evitar la contaminación radiactiva, no solo de los profesionales implicados, sino también de los propietarios responsables del cuidado de los



María Luisa Tormo.



María Isabel García Real.

animales y de los acompañantes. “Cuando se utilizan radioisótopos para diagnosticar una enfermedad (por ejemplo, en un caballo), hay que controlar la orina, que no puede verterse al circuito normal, hay que recogerla, esperar a que decaiga, lo mismo que pasa en medicina humana”, recuerda Tormo

Nadie es ajeno a los incidentes. Según Tormo, para evitar problemas lo ideal sería la sedación o la inmovilización mediante elementos mecánicos o elementos de sujeción como sacos de tierra, cuerdas o esparadrapos. “La sedación supone un encarecimiento de la operación, pero yo la aconsejo, salvo en aquellos animales con problemas graves como un edema pulmonar. Cuando nosotros hacemos prácticas, en posiciones complejas como la cabeza, la columna y articulaciones las hacemos con los pacientes sedados”, dice García Real

Fuera de las clínicas

Hay multitud de centros para pequeños animales, incluidos perros, gatos, conejos, hurones, pájaros y otros más exóticos, pero la radiología también se da en explotaciones de bovino, equino, ovino, y caprino. Con grandes animales, si bien

existen hospitales, muchas veces el veterinario se tiene que desplazar con sus equipos portátiles a las explotaciones. Además del equipo de radiología digital para visualizarlo en el ordenador también van equipados con el blindaje necesario ya que no existe el estructural, sobre todo las nuevas generaciones, que parece que están más concienciadas con su seguridad.

Para Atocha Calvo, especialista en caballos, “la preocupación por la seguridad existe en los jóvenes veterinarios. Tal vez los más mayores le daban menos importancia. Pero yo por ejemplo, voy con todo el equipamiento necesario; además de los equipos portátiles usamos los delantales reglamentarios y no sólo para mí, sino también para las personas que me van a ayudar a inmovilizar al caballo”.

De la misma opinión es Carlos Rojo del Oceanogràfic de Valencia, “los veterinarios jóvenes se preocupan más por su seguridad y la de los otros implicados. La gente no piensa en peces, delfines o belugas. Generalmente para poder realizarles una radiografía a este tipo de animales los anestesiados e intentamos cumplir con toda la normativa. Dependiendo de la especie utilizamos elementos portátiles y otras veces usamos un recinto cerrado

para realizar un TAC, pero usamos salas con pared y cristal plomado, collarines y guantes. Algunas veces tenemos que pedir ayuda a los cuidadores, así que utilizamos sacos de arena y cuerdas o esparadrapos para sujetarlos. Son muy pocas las veces en las que estamos expuestos. Además, realizamos densimetrías individuales y las menos radiografías posibles”.

El Oceanogràfic dispone de un mini hospital con máquinas de anestesia, láser quirúrgico, endoscopia rígida y flexible, ecografía, radiología digital, máquina de análisis de sangre, plasma y de hormonas, entre otros equipos. La medicina humana está mucho más avanzada que la veterinaria, y por este motivo tratan de implicar a los médicos para que puedan trabajar con delfines o tortugas. “En medicina humana, si eres radiólogo no eres cardiólogo y si eres cardiólogo no eres anestesista”, apunta. “Nosotros tenemos ese gran abanico donde es diferente trabajar una especialidad de la medicina en una tortuga, en un caballito de mar, en un delfín”. Todos coinciden en que la formación continuada es necesaria para obtener los máximos conocimientos sobre la práctica radiológica generalizada en veterinaria. ©

Situación actual del almacenamiento temporal en seco del combustible gastado en contenedores

El almacenamiento temporal del combustible nuclear gastado es una etapa intermedia del ciclo del combustible necesaria hasta su gestión final en un almacén geológico profundo. Actualmente, existen en España seis almacenes temporales individualizados (ATI) donde se almacena en seco el combustible gastado (CG) en contenedores autorizados que permiten la operación de las centrales nucleares o su desmantelamiento y, en ausencia de un almacén temporal centralizado (ATC), se prevé la construcción de dos más y la ampliación de los existentes. La seguridad de esta modalidad de almacenamiento se garantiza por el diseño, mediante componentes pasivos, de los contenedores que están sometidos a un estricto proceso de evaluación y licenciamiento por parte del CSN, al igual que el propio ATI y la losa sísmica de hor-

migón donde se ubican los contenedores. Así mismo las actividades de fabricación y uso en las centrales nucleares son supervisadas por el CSN. España se suma a la amplia experiencia internacional en el uso de contenedores de almacenamiento, cuando se cumplen 20 años desde la carga del primer contenedor ENSA-DPT en la central nuclear Trillo. El CSN ha informado recientemente sobre la renovación de la licencia de dicho contenedor. En este artículo se describe la situación actual de la gestión intermedia del CG, las características de diseño de los contenedores y los procesos de licenciamiento y renovación de autorizaciones.

■ Texto: **Juan José Montesinos Castellanos y Álvaro Junghanns Hernández** | Área de Residuos de Alta Actividad del CSN ■

En un ciclo de combustible abierto, como el que se contempla en España, una vez que el combustible ha producido la energía prevista en su diseño durante su irradiación en los reactores, es decir, cuando se alcanza su quemado final de descarga, pasa a ser gestionado como residuo radiactivo.

Durante su irradiación en el reactor, el combustible nuclear acumula radioisótopos como son los actínidos, los productos resultantes de las reacciones de fisión, y los productos de activación a consecuencia de las reacciones de absorción neutrónica en los componentes estructurales del combustible. La presencia de emisores alfa de vida larga y emisores beta-gamma con periodos de semi-desintegración superiores a 30 años, unido a la emisión de calor debido a los procesos de desintegración, condiciona la gestión del CG como residuo radiactivo de alta actividad. Su almacenamiento, como es-

trategia para su gestión intermedia antes de su disposición final, deberá contemplar los riesgos inherentes asociados, como son la irradiación o el riesgo de criticidad, este último debido a las cantidades remanentes de isótopos fisionables. Por ello los medios de almacenamiento deben contar con las barreras adecuadas para proteger a las personas, como los blindajes biológicos para atenuar las radiaciones ionizantes, con medios activos y/o pasivos que permitan una adecuada evacuación del calor generado que impida su degradación y con configuraciones geométricas de almacenamiento y uso de materiales absorbentes neutrónicos que garanticen una adecuada seguridad frente a criticidad.

El almacenamiento del CG se realiza, mayoritariamente, en las piscinas de las centrales nucleares. A medida que éstas se han saturado, las centrales han transferido el combustible a instalaciones de almacenamiento en seco en los ATI situados

en sus emplazamientos. En la actualidad, ante la ausencia en España de una instalación para el almacenamiento centralizado, la estrategia de gestión de las centrales para permitir su operación hasta las fechas de cese previstas en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), se basa fundamentalmente en tres acciones: el aumento de la capacidad útil de sus piscinas, la transferencia del combustible a los ATI mediante contenedores de almacenamiento o de doble propósito (almacenamiento y transporte) y la ampliación de los ATI que estén próximos a saturación, ya sea mediante su re-densificación (sin ampliar el espacio físico que ocupa), ya mediante la construcción de nuevas losas de almacenamiento.

Situación en España

En un ciclo abierto el combustible gastado permanece almacenado temporalmente en las piscinas de las centrales nu-

cleares, y en otros sistemas de almacenamiento, individualizado o centralizado, a la espera de su gestión final en un almacén geológico profundo (AGP).

En España, a comienzos del año 2022 el número total de elementos de combustible almacenados en las centrales nucleares era de 17.062, que corresponde a un total de 5.370 toneladas de uranio, de los cuales, 14.601 se almacenan en piscinas y 2.461 en 85 contenedores en los ATI. En la tabla 1 se detalla el inventario almacenado en las piscinas y en los ATI, su capacidad y grado de ocupación.

A este inventario hay que añadir 13 m³ de residuos vitrificados de alta actividad provenientes del reprocesado del combustible de Vandellós I y que se encuentran actualmente en Francia. Enresa prevé licenciar un almacén para alojar estos residuos en el emplazamiento de Vandellós I que entraría en operación en 2027.

Central nuclear Trillo

La mayor parte su inventario se almacena en el ATI, 800 elementos frente a los 568 de la piscina, en 32 contenedores ENSA-DPT y 4 ENUN 32P. Funciona desde 2002 y está autorizado para almacenar hasta 32 contenedores ENSA-DPT, y 48 contenedores ENUN 32P, suficiente para albergar todo el inventario hasta el cese de la operación, previsto en 2035.

Central nuclear José Cabrera

El proceso de desmantelamiento se encuentra en su fase final, previa a la ejecución del Plan de Restauración del Emplazamiento. Posee un ATI que alberga los 377 elementos en 12 contenedores HI-STORM 100Z desde 2009. Además, desde 2013 almacena los residuos especiales del desmantelamiento (principalmente internos del reactor activados) en 4 contenedores HI-SAFE.



Contenedores en los ATI de Trillo y José Cabrera.

Central nuclear Ascó

Su ATI, consistente en dos losas de almacenamiento a la intemperie, entró en operación en 2013. A comienzos de 2022 almacenaba 26 contenedores HI-STORM 100 de los 32 autorizados. En marzo de 2022 se autorizó aumentar cuatro posiciones de almacenamiento, prolongando así su capacidad en un ciclo adicional de operación de cada unidad, hasta 2027 y 2028. Adicionalmente, se prevé la am-

pliación del ATI para garantizar la operación de la central hasta la fecha de cese, prevista para 2030-2032.

Central nuclear Almaraz

El ATI consta de una losa y está autorizado para 20 contenedores ENUN 32P, lo que permitirá la operación hasta las fechas de cese, previstas para ambas unidades en 2027-2028. Entró en operación en 2018 y actualmente almacena seis conte-

Tabla 1. Inventario de combustible gastado y situación de las instalaciones de almacenamiento de las centrales nucleares españolas a 1-01-2022

Central nuclear	Capacidad de almacenamiento autorizada	Combustible gastado almacenado		
		Nº de Elementos (grado de ocupación*) y Tipo Contenedor(nº)	Toneladas de Uranio (tras irradiar)	
Almaraz	Piscina Unidad 1	1.804	1.604 (98%)	699
	Piscina Unidad 2	1.804	1.536(95%)	669
	ATI (EC)	640	192 (30%)	84
	Contenedor (nº)	20 ENUN 32P	ENUN 32 P (6)	
Ascó	Piscina Unidad 1	1.421	1.160 (94%)	499
	Piscina Unidad 2	1.421	1.132 (91%)	489
	ATI (EC)	1.024	832 (81%)	357
	Contenedor (nº)	32 HI STORM 100	HI-STORM 100 (26)	
Cofrentes	Piscina	5.404	4.704 (98%)	802
	ATI (EC)	1.248	260 (21%)	46
	Contenedor (nº)	24 HI-STAR 150	HI-STAR 150 (5)	
Trillo	Piscina	805	568 (92%)	251
	ATI (EC)	2.208	800 (36%)	355
	Contenedor (nº)	32 ENSA-DPT	ENSA-DPT (32)	
		48 ENUN 32P	ENUN 32P (4)	
Vandellós II	Piscina	1.802	1.392 (77%)	597
José Cabrera	ATI (EC)	377	377 (100%)	100
	Contenedor (nº)	16 HI-STORM 100Z	HI-STORM 100Z (12)	
			HI-SAFE 100Z (4)	
Santa María de Garoña	Piscina	2.609	2.505 (96%)	420
	ATI (EC)Contenedor (nº)	52010 ENUN 52B	0	0
Total Piscinas			14.601 (86%)	4.428
Total ATIs			2.461 (52%)	942

*Ocupación útil de piscina considerando restricciones y sin contar la reserva del núcleo.

nedores. Para el desmantelamiento de los reactores está previsto ampliar el ATI para alojar todo el CG de ambas unidades.

Central nuclear Santa María de Garoña

La central alberga en su piscina todo el inventario de CG: 2.505 elementos. Durante la primera mitad del 2022 se han realizado las pruebas pre-operacionales del contenedor ENUN 52B previas a su carga real. La campaña de carga se inició en junio de 2022. El ATI consta de dos losas a la intemperie y fue autorizado en 2018 para un total de diez contenedores, capacidad que deberá ser ampliada para

permitir el vaciado de la piscina y el desmantelamiento de la instalación.

Central nuclear Cofrentes

El ATI consta de dos losas a la intemperie para almacenar un total de 24 contenedores HI-STAR 150. Desde 2021, alberga los cinco contenedores cargados en su primera campaña. Debido al alto grado de ocupación de sus piscinas se prevé la carga en contenedores antes de la próxima parada por recarga de combustible, prevista para 2023.

Central nuclear Vandellós II

En 2020 la central amplió su capacidad

en piscina mediante la sustitución de sus bastidores por otros más compactos, aumentando el número de posiciones de almacenamiento en 208. Aunque esta modificación permite la operación de la central hasta 2027, seguirá siendo necesario disponer de un ATI para continuar la operación hasta la fecha de cese, en 2035.

El actual escenario de la gestión intermedia del CG se enmarca en la ausencia del ATC previsto en el vigente Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR). El proceso de evaluación de la Autorización de Construcción del ATC en Villar de Cañas se interrumpió en julio de 2018, tras la comunicación remitida al CSN



Contenedores en el ATI de Santa María de Garoña.

por parte del secretario de Estado de la Energía, en la que se solicitó la suspensión de la emisión del informe preceptivo y vinculante sobre dicha autorización de construcción.

La situación es muy similar a la de países como Estados Unidos, en el que a mediados de 2022 se almacenan 3.751 contenedores repartidos en los 81 ATI que se indican en la figura 1. En Alemania, el CG se almacena también en seco en contenedores en trece almacenes en las centrales nucleares repartidas en el país. A 31 de diciembre de 2019, había 631 contenedores metálicos de doble propósito almacenados. Además, existen cuatro almacenes centralizados para los residuos vitrificados procedentes del re-procesado de combustible.

Diseño y licenciamiento de contenedores

Los contenedores de almacenamiento de CG y sus sistemas auxiliares son equipos complejos que están diseñados para realizar todas las operaciones previstas, in-

cluida su carga, acondicionamiento y transferencia al ATI, sin que éstas supongan riesgos inaceptables para la salud de los trabajadores, el público y el medio ambiente. La industria ha desarrollado diferentes diseños de contenedores que se clasifican en los dos grupos conceptuales representados en la figura 2:

—Contenedores de doble propósito, diseñados para las modalidades de almacenamiento y transporte, que están constituidos por un cuerpo cilíndrico metálico rodeado de un blindaje neutrónico, que en su interior aloja un bastidor para el combustible, dotado de un absorbente neutrónico para garantizar la subcriticidad, y cuyo cierre se realiza mediante dos tapas empernadas provistas de sellos redundantes, que proporcionan un alto nivel de estanqueidad. La cavidad interior del contenedor se rellena con un gas inerte, generalmente helio, para prevenir la degradación del combustible. El conjunto proporciona el blindaje contra la radiación gamma y neutrónica, el confinamiento del material radiactivo, así

como el medio para la evacuación del calor residual del CG, que se ve favorecida mediante el uso de aletas metálicas (internas o externas).

Durante el periodo de almacenamiento, y para verificar que se mantiene la estanqueidad, se establece una vigilancia de la presión del espacio entre las tapas, que se rellena también de un gas inerte a una presión superior a la de la cavidad interior, con el objeto de evitar la fuga de material radiactivo al ambiente. Estos contenedores disponen de muñones para su elevación y manejo, y en la modalidad de transporte llevan adaptados en sus extremos sendos limitadores de impacto, que se emplean para amortiguar las fuerzas originadas en los accidentes de caída que se postulan en el diseño.

—Sistemas modulares, compuestos de cápsulas multipropósito, que alojan en su interior el CG, y que se introducen en módulos específicos para su almacenamiento o transporte. Las cápsulas están constituidas por un cilindro de acero inoxidable, que alojan en su interior el bas-

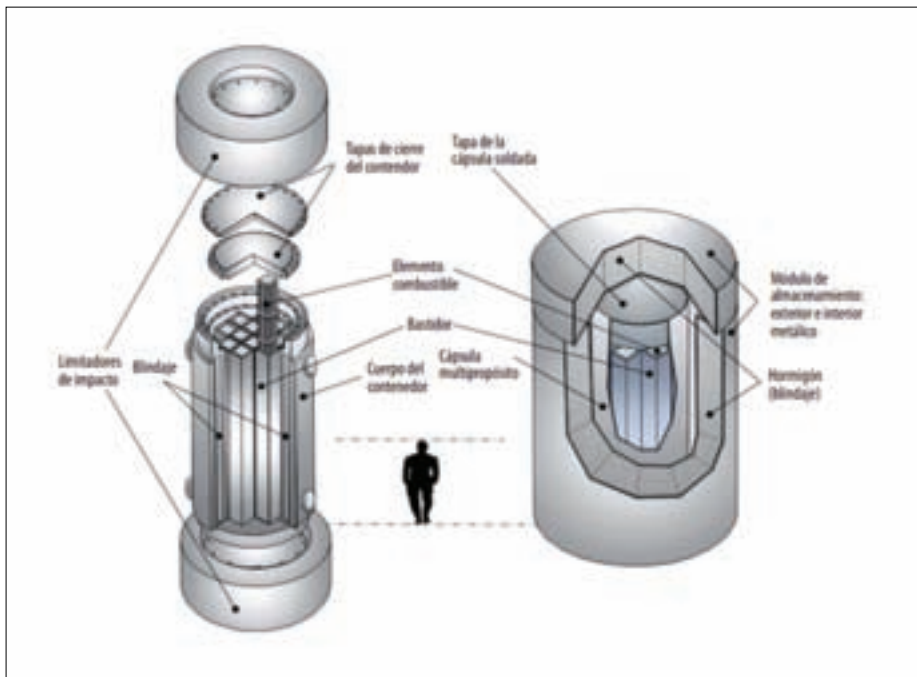


Figura 2. Diseño de módulo de transporte (izquierda) y de almacenamiento (derecha).

tidor, provisto de absorbente neutrónico para garantizar la subcriticidad del contenido, y cuyo cierre se efectúa mediante una tapa soldada. Previo a su cierre, la cavidad interior se rellena con gas inerte a presión que, además de prevenir la degradación del CG, facilita la evacuación de la potencia térmica residual mediante su circulación natural. La cápsula proporciona también la barrera de confinamiento del sistema.

El módulo de almacenamiento proporciona un blindaje frente a la radiación, así como un medio para evacuar la potencia térmica de la cápsula, para lo cual cuenta con conductos de entrada y salida de aire que permiten su circulación natural. Por su parte, el módulo de transporte va provisto de una tapa de cierre empernada con junta de estanqueidad, que proporciona una barrera redundante de confinamiento. El módulo dispone de los correspondientes muñones de manejo y limitadores de impacto (ver figura 2).

En ambos casos se trata de diseños robustos, capaces de mantener las funciones de seguridad en todas las condiciones que se postulan en su diseño. Mi-

den alrededor de cinco metros de altura y pueden pesar hasta 170 toneladas. Una vez cargados con CG en su interior bajo agua, el contenedor o la cápsula multipropósito se extrae de la piscina empleando una grúa diseñada para cumplir el criterio de fallo único que impide la caída de la carga en caso de que se presente cualquier fallo aislado, ofreciendo un elevado nivel de seguridad. Posteriormente, se realizan las operaciones para drenar y secar la cavidad interior hasta alcanzar un nivel de humedad remanente que minimice la posibilidad de degradación del CG durante el tiempo de almacenamiento previsto. Seguidamente se rellena la cavidad con un gas inerte y se verifica que la fuga a través de la barrera de confinamiento del contenedor es consistente con las hipótesis consideradas en su diseño. Finalmente, el contenedor se traslada a su posición de almacenamiento en el ATI, mediante dispositivos diseñados con el criterio de fallo único.

El cumplimiento de las funciones de seguridad del contenedor se basa en el principio de la seguridad pasiva; esto es, incorporando componentes cuya fun-

cionalidad no depende de fuentes de energía externa, tanto en las condiciones normales de almacenamiento como en las situaciones de accidente que se postulan. Así, los contenedores se diseñan para:

- Evitar la criticidad del CG almacenado. El potencial para la criticidad del combustible, es decir, la capacidad para iniciar una reacción nuclear de fisión en cadena es menor cuanto mayor haya sido el periodo de irradiación en el reactor. Los métodos empleados para el control de la criticidad generalmente contemplan el uso de disposiciones geométricas favorables del CG y de los contenedores, combinadas con el uso de absorbentes neutrónicos, o venenos, que evitan la posibilidad de alcanzar una reacción en cadena autosostenida.
- Evacuar la potencia térmica residual del CG al ambiente. Las desintegraciones radiactivas de los núcleos presentes en el CG generan una potencia térmica residual que es preciso evacuar a un ritmo adecuado para preservar la integridad del CG y de los componentes del contenedor. Esa potencia térmica residual es máxima en el momento de la descarga del combustible del reactor por lo que es necesario su almacenamiento inicial bajo agua y se reduce progresivamente con el paso del tiempo.

El diseño térmico del contenedor debe demostrar que las temperaturas máximas sean inferiores a los correspondientes límites térmicos que garanticen la integridad del combustible y componentes del contenedor, y que la presión máxima en la cavidad interior cumple con los límites de diseño. Dicha demostración considera además las condiciones ambientales más desfavorables, como una temperatura ambiente conservadoramente superior a la re-

gistrada en los emplazamientos de almacenamiento, o el aporte de energía térmica en la superficie del contenedor por su exposición a la radiación solar y la presencia de otros contenedores a su alrededor.

La potencia térmica es evacuada al ambiente mediante una combinación de procesos convencionales: conducción, convección y radiación. Generalmente todos los componentes del contenedor participan en la evacuación de la potencia térmica residual, aunque en algunos casos el diseño incorpora componentes específicos para facilitarla, como las aletas de refrigeración.

- Proporcionar blindaje contra la radiación. Durante su irradiación en el reactor, el combustible acumula radioisótopos, como los propios actínidos, los productos de fisión resultantes y productos de activación. Se hace por tanto necesario que el diseño de los contenedores incorpore los blindajes apropiados para atenuar la radiación de forma que no supongan un riesgo inaceptable para los trabajadores y el público. Generalmente las emisiones alfa y beta quedan retenidas dentro de la matriz del CG. Sin embargo, la emisión neutrónica y la gamma, con un alto poder de penetración en la materia, requieren del uso de blindajes específicos.

El blindaje empleado en los dos diseños conceptuales de contenedor se configura de forma diferente. Para los sistemas modulares con cápsula multipropósito, el módulo de almacenamiento contiene una capa concéntrica gruesa de hormigón que envuelve a la cápsula, proporcionando el blindaje necesario frente a la radiación neutrónica y gamma.

En los contenedores de doble propósito, el blindaje contra la ra-

diación gamma lo proporciona la gruesa envuelta de acero, complementado en algunos diseños con componentes de plomo. Estos diseños incorporan también un blindaje frente a la radiación de neutrones, constituido por un compuesto polimérico de baja densidad que reduce la energía de los neutrones, facilitando su absorción en un veneno neutrónico, generalmente boro.

En cualquier caso, las dosis de radiación que pueden recibir los miembros del público se reducen a valores lo más bajo posible y siempre por debajo de los límites admisibles de dosis. Para el diseño de los ATI la normativa establece una restricción de dosis efectiva anual inferior a 250 μ Sv (microSievert), a cualquier miembro del público que se localice más allá del área controlada, un 25 % del límite de dosis vigente.

- Mantener el confinamiento del CG. Los contenedores de almacenamiento deben evitar la liberación de material radioactivo al ambiente, objetivo que se logra dotando al contenedor con una barrera de confinamiento con cierre redundante. Para los contenedores de cierre empernado, dicha redundancia se logra mediante el uso de sellos dobles de cierre dispuestos en las tapas de cierre. Se establece además una vigilancia de la presión del espacio ubicado entre ambas tapas para alertar de una degradación de los sellos, de forma que se anticipen las acciones correctivas oportunas.

Para los diseños con cápsulas multipropósito, el cierre de la barrera se consigue mediante la soldadura de la tapa al cuerpo de la cápsula, que asegura una fuga nula al exterior. Los ensayos realizados sobre las soldaduras garantizan la efectividad de

la barrera de confinamiento, que no requiere del establecimiento de una vigilancia específica.

Para los contenedores con cápsula soldada, así como para aquellos diseños con cierre empernado que garanticen un nivel de estanquidad consistente con una fuga nula, se considera que la emisión de efluentes al ambiente es inexistente y por tanto que dicha vía de exposición no supone un riesgo radiológico indebido para los trabajadores y los miembros del público.

Para el resto de los diseños se debe demostrar, considerando las hipótesis más desfavorables y con la máxima cantidad de material radiactivo prevista, que las dosis están por debajo de los límites reglamentarios. En estas circunstancias, se debe cumplir que, en el límite de la instalación, la suma de las dosis recibidas por el público debida a la radiación atenuada por los blindajes y la resultante a partir de los efluentes liberados es también inferior a los límites aplicables.

Además de evitar la emisión de efluentes, la barrera de confinamiento tiene como función garantizar una atmósfera inerte en la cavidad interior, exenta de especies oxidantes. Con ello se contribuye a garantizar que se preserva la integridad del CG y de los componentes internos del propio contenedor.

- Asegurar la recuperabilidad del combustible en las condiciones postuladas en el diseño, con objeto de facilitar la gestión posterior del CG.
- Asegurar la integridad estructural del combustible y de la barrera de confinamiento del contenedor en todas las condiciones de diseño. En el diseño se postulan una serie de escenarios de accidente, entre los que se consideran caídas durante el ma-

Tabla 2 : Contenedores de almacenamiento licenciados en España.

Tipo genérico	Nombre (Instalación)	Contenidos aprobados	Fecha aprobación almacenamiento (Inicio de uso)	Titular Aprobación de Diseño	Diseño	Fabricante
	Tipo de combustible	Quemado máx. (MWd/MTU)/ enriq. inicial Máx. % peso U-235) [1]				
Contenedores metálicos de doble propósito: almacenamiento y transporte	DPT (Trillo)	49.000-4 %	03/06/2002(2003)	ENRESA	NAC	ENSA
	KWU 16X16					
	ENUN 32P (Trillo y Almaraz)	58.000-4,9 %	22/09/2015(2018)	ENSA	ENSA	ENSA
	KWU 16X16 y WE 17x17					
	ENUN52B (Garoña)	37.500-2,8 %	20/11/2014(2022)	ENSA	ENSA	ENSA
	BWR GE-06/07					
	HI-STAR150 (Cofrentes)	55.000-5 %	23/05/2021(2021)	ENRESA	HOLTEC	HOLTEC
	BWR GE6,GE7,GE10, GE11, GE12, GE14, SVEA96+, GNF2, SVEA96 Optima 2, ATRIUM 10XP					
Sistema con cápsula multipropósito (MPC) y módulo de almacenamiento de hormigón	HI-STORM 100Z (J. Cabrera)	45.000-3,65 %	08/08/2006(2009)	ENRESA	HOLTEC	ENSA HOLTEC
	WE 14x14					
	HI-STORM 100 (Ascó)	55.000-4,2 %	10/02/2011(2013)	ENRESA	HOLTEC	ENSA HOLTEC
	WE 17x17					

[1] Valores máximos que además deben cumplir con las curvas de carga correspondientes para carga uniforme o regionalizada y con el tiempo de enfriamiento mínimo en cada caso. El almacenamiento de combustible superior a 45.000 MWd/TmU está actualmente limitado a 20 años de almacenamiento.

Lista de acrónimos y siglas: ENSA: Equipos Nucleares S.A. NAC: Nuclear Assurance Corporation. HI-STORM Holtec International Storage Module. HI-STAR: Holtec International Storage, Transport & Repository.

nejo del contenedor, terremotos, tornados, inundaciones, incendios y temperaturas extremas. En estas situaciones se debe demostrar que la integridad del combustible es coherente con las hipótesis empleadas en los análisis de blindaje, térmico y criticidad. También se debe asegurar la integridad de la barrera de confinamiento, de forma que se garantice que las emisiones al ambiente no supongan un riesgo inaceptable para los trabajadores y miembros del público, así como la capacidad de manejo del contenedor para facilitar su acondicionamiento posterior.

El Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR) establece las bases para el licenciamiento de los

contenedores y de las instalaciones de almacenamiento en que se ubican. Por un lado, es preciso la aprobación del diseño del contenedor en base al artículo 80 del RINR; por otro, es necesaria la autorización de la instalación de almacenamiento, que en el caso de los ATI se tramita como una modificación de diseño de la central nuclear en que se ubique, de acuerdo con lo establecido en el artículo 25 del RINR. La seguridad del almacenamiento del CG en los contenedores se garantiza mediante el estricto cumplimiento de los requisitos contenidos en la normativa, orientados a verificar el cumplimiento de las funciones de seguridad mencionadas.

Los requisitos de seguridad aplicables a los contenedores de almacenamiento se desarrollan en la instrucción del CSN

IS-20, que además incluye requisitos aplicables a la fabricación, uso, modificaciones de diseño y garantía de calidad. Se completan con los contenidos en la instrucción del CSN IS-29, aplicable a las instalaciones de almacenamiento temporal. Ambas normas se inspiran en la normativa de la Nuclear Regulatory Commission (NRC) de los Estados Unidos, país origen de la tecnología empleada en España. Además, la normativa española tiene en cuenta los requisitos desarrollados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y los denominados “niveles de referencia” elaborados por el grupo de reguladores europeos (WENRA).

La evaluación técnica realizada por el CSN verifica el cumplimiento con la normativa aplicable, comprobando que

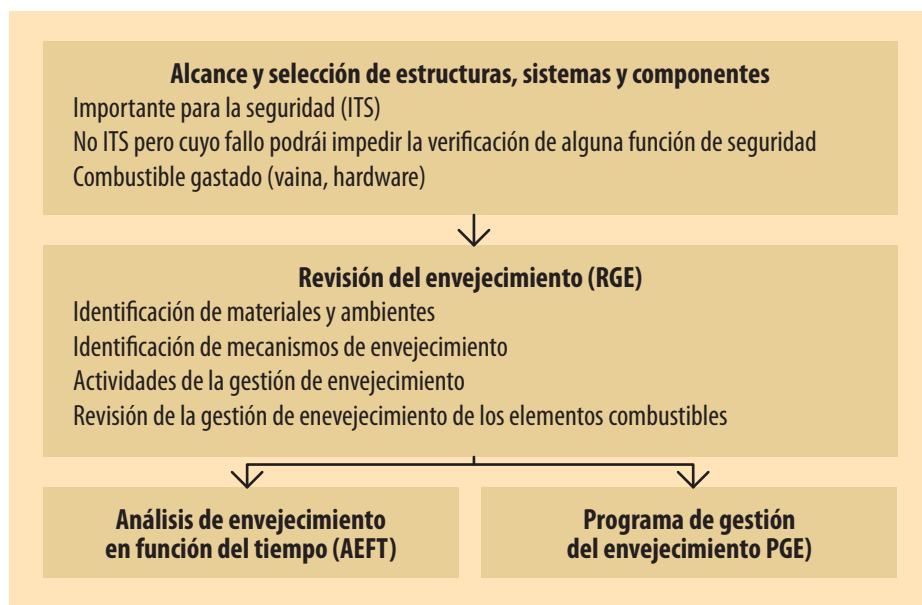


Diagrama de flujo del proceso de plan de gestión de vida.

los métodos y resultados obtenidos son adecuados para todos los análisis implicados, y que dichos métodos y códigos de cálculo han sido debidamente validados. En algunos casos, el CSN también contrasta los resultados realizando análisis independientes, empleando métodos distintos a los empleados por el diseñador. En la tabla 2 figuran los contenedores licenciados actualmente en España y sus características.

Debido a la incertidumbre sobre la disponibilidad del ATC, y con objeto de garantizar la operación de las centrales hasta la fecha de cese prevista en el PNIEC y el posterior vaciado de las piscinas de CG en menos de tres años tras su cese, Enresa ha considerado como mejor opción la de unificar las soluciones a aportar a cada instalación en una única. Tras la experiencia adquirida de más de 20 años de gestión de sistemas de almacenamiento en seco de CG, se ha definido como opción más favorable el uso de sistemas modulares con cápsulas soldadas en cualquiera de sus variantes (sobre losa en vertical, en nichos en horizontal, o semienterrados), complementado con módulo para su transporte fuera de la instalación.

En julio de 2021 el gobierno autorizó la licitación de nuevas soluciones de almacenamiento en seco de combustible nuclear, con objeto de disponer de un sistema único que permita el almacenamiento en seco del CG que se genere en las centrales de Ascó, Cofrentes y Vandellós II a partir de 2026. En la central de Almaraz el nuevo sistema permitirá el inicio del vaciado de sus piscinas tras la parada definitiva de sus dos unidades, prevista en 2027 y 2028, para iniciar su desmantelamiento. Este sistema de almacenamiento deberá ser autorizado por la DGPEM si bien se estima que permitirá reducir los plazos de tiempo de licenciamiento del CSN en una situación con múltiples diseños, así como otras ventajas como optimizar costes, flexibilizar los suministros y equipamientos auxiliares y transmitir experiencias y conocimientos.

Renovación de la aprobación de diseño. Planes de gestión de vida de los contenedores

De acuerdo con la Instrucción del CSN IS-20, las aprobaciones de diseño de los contenedores se conceden por un periodo máximo de 20 años. El primer contenedor licenciado en España es el

sistema ENSA-DPT empleado en el ATI de Trillo, que obtuvo la aprobación de diseño mediante resolución de la DGPEM en junio de 2002 y por tanto su vigencia venció en junio de 2022. Dicha Instrucción contempla que las aprobaciones de diseño puedan ser renovadas previa justificación de que el almacenamiento del CG no ha afectado adversamente a las estructuras, sistemas y componentes (ESC) del contenedor importantes para la seguridad.

De acuerdo con la normativa, la citada justificación requiere de la elaboración de un Plan de gestión de vida (PGV) del contenedor, en el que se contemple un programa de acciones de gestión del envejecimiento con el objetivo de alcanzar la vida útil del contenedor sin deterioro de la seguridad y manteniendo el cumplimiento de sus bases de licencia. Los PGV, que son específicos de cada diseño de contenedor y contenido, comprenden las siguientes etapas:

— Alcance y selección de componentes. Se realiza un cribado con el objetivo de identificar aquellas ESC del contenedor que deban incluirse en el PGV. Comprende las ESC clasificadas como importantes para la seguridad y también el propio CG, así como aquellas ESC no clasificadas como tales, pero cuyo fallo pudiera impactar en el cumplimiento de las diferentes funciones de seguridad del contenedor (confinamiento, control de criticidad, blindaje, evacuación de calor, integridad estructural, soporte a la operación y recuperación del CG).

— Revisión de la Gestión del Envejecimiento (RGE). Se evalúa el comportamiento de las ESC incluidas en el PGV a lo largo de la vida de diseño del contenedor frente a los potenciales mecanismos de degradación, los cuales se seleccionan siguiendo los criterios establecidos en la normativa aplicable. La RGE concluye con la identificación de aquellos efectos del envejecimiento (corrosión,

fatiga, fluencia térmica, etcétera) que de no ser gestionados a tiempo podrían producir una pérdida de la función de seguridad realizada. Así, como resultado de la RGE se obtienen los diferentes pares material-mecanismo de degradación para los que se considera necesario definir una actividad de gestión del envejecimiento específica.

— Etapa de resolución. Se propone resolver cada par material-mecanismo de degradación identificado en la RGE, mediante la realización de un análisis que demuestre que la degradación sufrida es insuficiente para impedir el desarrollo de la función de seguridad a lo largo del periodo de operación considerado (análisis de envejecimiento en función del tiempo, o AEFT), o bien estableciendo un programa de gestión del envejecimiento (PGE) que permita monitorizar y controlar la degradación sufrida.

También se define un proceso de realimentación, en el que se realiza una revisión periódica del PGV, tomando como base la información surgida a raíz de la experiencia operativa tanto propia como ajena. Ello permite implementar un mecanismo para incorporar posibles efectos del envejecimiento cuyo conocimiento no estaba disponible en el momento de la renovación de la aprobación de diseño del contenedor. Además, permite incluir mejoras en el alcance de los PGE a partir de la experiencia obtenida en su ejecución.

La solicitud para la renovación de la aprobación de diseño del contenedor ENSA-DPT fue presentada por Enresa en mayo de 2021 y, tras el correspondiente proceso de evaluación, en junio de 2022 el CSN ha emitido el informe favorable que permite a la DGPEM la emisión de la renovación por un periodo de 20 años adicionales a los de la licencia original.

Fabricación y uso de contenedores

Los titulares de la aprobación de diseño de los contenedores de almacenamiento

y transporte de CG son los responsables de garantizar que los componentes de los contenedores fabricados cumplen con el diseño aprobado por la DGPEM. Para ello, se les requiere disponer de un programa de garantía de calidad que cumpla con los criterios establecidos en la normativa. Este programa está sometido también a la evaluación del CSN. Además, deben asegurarse de que estos programas se implementen correctamente durante el diseño y la fabricación.

Como parte de su función de supervisión, el CSN inspecciona las empresas que diseñan y fabrican los contenedores de almacenamiento y transporte. Se examinan los controles para la fabricación y el proceso para verificar que los componentes fabricados cumplen con el diseño aprobado.


Las centrales nucleares son, así mismo, responsables de asegurar que sus instalaciones de almacenamiento cumplen con la normativa, durante la construcción del ATI y durante el uso de los contenedores. Antes de la carga real con combustible se realizan las pruebas preceptivas pre-operacionales de los contenedores sin combustible nuclear, o pruebas en frío, con objeto de verificar el correcto funcionamiento de todos los equipos y sistemas en la planta. Los inspectores del CSN verifican el cumplimiento de la normativa y el diseño del contenedor durante estas pruebas y durante la carga de combustible.

Conclusiones

La experiencia mundial en el uso de estos sistemas, que comenzó a finales de los años 80, revela una ausencia de incidentes significativos con consecuencias destacables para la seguridad nuclear y la protección radiológica. En España, el uso de contenedores para el almacenamiento en seco del CG se ha generalizado y sucesivamente se ha visto am-

pliado para permitir la operación de las centrales nucleares y su posterior desmantelamiento.

Los contenedores de almacenamiento de CG y sus sistemas auxiliares son equipos complejos que requieren un detallado proceso de evaluación y licenciamiento. Además, la necesidad de ampliar los contenidos autorizados de los contenedores para combustible de mayor grado de quemado, con defectos y dañados, requieren la evaluación técnica para su aprobación y uso, lo que conlleva una dedicación significativa en las actividades del CSN.

La seguridad de los contenedores se garantiza para el almacenamiento a largo plazo mediante la implantación de los planes de gestión de vida, que son evaluados por el CSN durante las preceptivas renovaciones de las aprobaciones de diseño. 

Referencias

- Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado. Año 2021
- Versión inicial del 7º Plan General de Residuos Radiactivos 11 de abril de 2022.
- Tercer Informe Nacional sobre la aplicación de la Directiva 2011/70/Euratom, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos (2021).
- Actuaciones de las centrales nucleares españolas para la liberación de espacio en las piscinas de combustible gastado e interacciones de licenciamiento con el CSN. Actualización a diciembre de 2021. TCN-22-01 Rev. 0, marzo de 2022.
- Store FUEL and Decommissioning Report 07 | Jun | 2022 VOL 24 | NO 286
- Germany Report of the Federal Government for the Seventh Review Meeting in May 2021 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC)

■ Texto: **Enrique García Fresneda** | Vocal asesor de la Unidad de Inspección
 y **Marta Barrientos Montero** | Coordinadora técnica en la DTSN ■

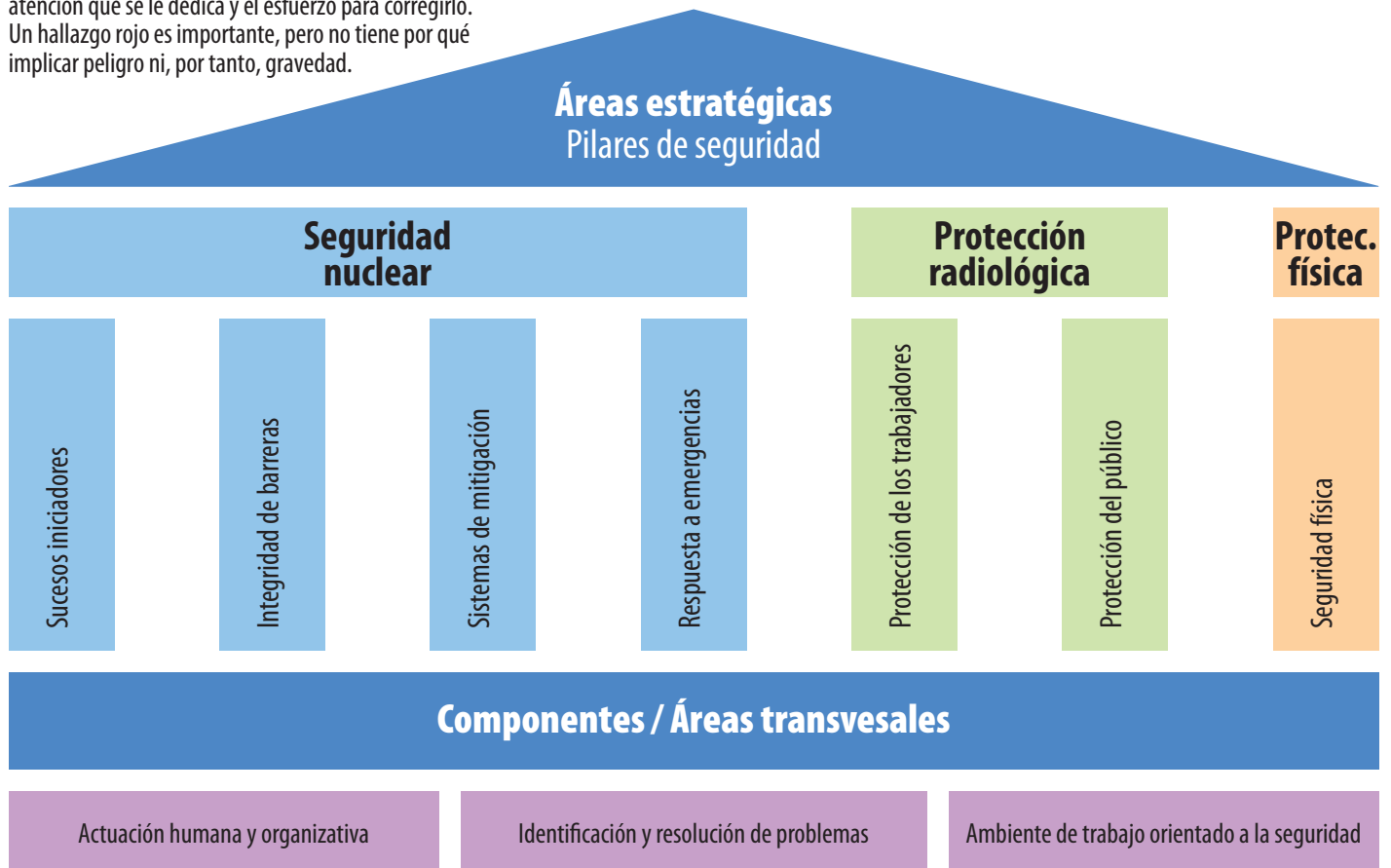
El SISC (Sistema Integrado de Supervisión de Centrales) es un conjunto de actividades, realizadas siguiendo procedimientos establecidos, que el Consejo de Seguridad Nuclear y los titulares de las centrales nucleares utilizan para supervisar el funciona-

miento de las centrales y, a partir de sus resultados, determinar las acciones correctoras necesarias.

www.csn.es/sisc



El concepto de “gravedad” se relaciona con el peligro, mientras que la “importancia” se relaciona con la atención que se le dedica y el esfuerzo para corregirlo. Un hallazgo rojo es importante, pero no tiene por qué implicar peligro ni, por tanto, gravedad.



El CSN supervisa la **cultura de seguridad** de las plantas para identificar potenciales debilidades en aspectos organizativos y culturales con impacto en la seguridad de las centrales nucleares (**componentes transversales asociados** a los hallazgos) y anticiparse a sus posibles consecuencias sobre el funcionamiento.



Los Indicadores de Funcionamiento están diseñados para caracterizar el funcionamiento de la central mediante datos numéricos, proporcionando así información sobre todos aquellos aspectos de la seguridad razonablemente susceptibles de ser cuantificados, en aras de lograr la máxima objetividad.

Los resultados de los indicadores se clasifican en rangos (umbrales) de importancia preestablecidos o bandas con un código de colores.



El programa de inspecciones consiste en observaciones, medidas, exámenes o pruebas directas cuyo fin es evaluar el estado de las estructuras, sistemas, componentes y materiales de la central, así como las actividades de operación, los procesos y procedimientos y la competencia del personal, permitiendo comprobar el cumplimiento de normas, buenas prácticas o compromisos documentados y, en definitiva, que la central opere de forma segura.

Los incumplimientos de normas, buenas prácticas o compromisos documentados, que no deberían haberse producido al disponer los titulares de capacidad razonable para su prevención o corrección, se denominan hallazgos de inspección y se categorizan según su importancia para la seguridad, según procedimientos de determinación de la importancia de los hallazgos para la seguridad, asociado a un código de colores.



Muy baja Baja o moderada Sustancial Alta

Matriz de acción

	Respuesta del titular (RT)	Respuesta reguladora (RR)	Un pilar degradado	Degradaciones múltiples / repetidas	Funcionamiento inaceptable
Color indicador/ Hallazgo inspección	Verde	1 o 2 blancos	1 amarillo (3 blancos)	Rojo o varios amarillos o pilar degradado continuado	Degradaciones múltiples reiteradas
Acción titular	Programa Acciones Correctoras (PAC)	Análisis de causa raíz	Análisis de causa raíz Evaluación de la cultura de seguridad	Análisis de causa raíz evaluación de la cultura de seguridad externa	OPERACIÓN PROHIBIDA Elaboración Plan de acción del titular
Acción CSN	Plan Base de Inspección (PBI)	PBI + Inspección suplementaria grado 1	PBI + Inspección suplementaria grado 2	PBI + Inspección suplementaria grado 3 Plan de seguimiento especial	Aprobación plan de acción

Yolanda Benito Moreno (Madrid, 1960) se doctoró en Ciencias Químicas en 1986 por la Universidad Autónoma de Madrid. La mayor parte de su trayectoria profesional la ha desarrollado en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), al que se incorporó en 1989, después de tres años como investigadora en el Instituto Geológico y Minero de España. Especializada en medio ambiente, dentro del Ciemat ha sido, entre otras cosas, jefa del Laboratorio de Técnicas Ambientales, responsable de la Unidad de Tratamientos de Efluentes y Residuos In-

dustriales y subdirectora general responsable del Departamento de Medio Ambiente. Es miembro de diversos comités y paneles, entre ellos del Consejo Nacional de Clima y del grupo que elabora el informe nacional al Convenio de Cambio Climático. Fue también responsable del Área de Sostenibilidad en el Ministerio de Ciencia e Innovación entre 2008 y 2010. Desde mayo de 2022 es directora general del Ciemat, primera mujer que ocupa este cargo, aunque no quiere resaltar este hecho, porque, según dice, hay que normalizar el acceso de las mujeres a cargos de decisión.

Yolanda Benito, directora general del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

“En estos momentos complicados tenemos que aprovechar todas las fuentes de energía disponibles”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■ Fotos: **Enrique de la Fuente** | Ciemat ■

PREGUNTA: *¿Cuáles considera que son las fortalezas y debilidades del Ciemat?*

RESPUESTA: Conozco bien la casa porque he formado parte de ella como responsable de uno de sus departamentos más grandes y durante los últimos años en el comité de dirección, pero es una visión diferente a la que se tiene desde la dirección general. Esta visión que estoy adquiriendo en estos meses me hace ser consciente de que realmente somos un centro muy inte-

resante, con un gran capital humano y con una posición de representación y de desarrollo científico y tecnológico en muchas áreas que son relevantes para la sociedad.

P: *Algunas de ellas insospechadas. Llama la atención, por ejemplo, que tengan un departamento de biología molecular.*

R: Si, puede sorprender un poco, pero tiene su explicación en nuestro pasado como Junta de Energía Nuclear, cuando se empezaron a analizar los efectos de las

radiaciones ionizantes en la salud. Después se ha ido posicionando en otras áreas que no tienen nada que ver con sus orígenes, como evolución y desarrollo de terapias para enfermedades raras.

P: *¿En qué aspectos tendría que mejorar el Ciemat?*

R: Creo que sobre todo habría que mejorar más en temas de gestión que en las capacidades científico-técnicas, que creo que son realmente espectaculares. Las

cosas que centran mi estrategia tienen que ver con la gestión económica, la de recursos humanos en general y la de todos los procedimientos, para modernizarnos, adaptarnos a los nuevos marcos.

P: *¿El Ciemat es suficientemente conocido por la sociedad?*

R: Yo creo que el Ciemat es muy conocido en nuestros ámbitos de actuación a nivel europeo y a nivel mundial. En cuanto a la sociedad tiene el mismo problema que otros centros de investigación, que no

R: Somos un centro de desarrollo tecnológico e históricamente hemos trabajado en la puesta al día de muchas tecnologías energéticas, como las renovables, que hoy impactan en la sociedad. ¿Qué podemos seguir aportando?, pues ser capaces de adaptarnos a los nuevos retos. El mundo de la energía es muy cambiante y la situación geopolítica nos ha hecho acelerar en algunos campos en los que nos estamos posicionando activamente. Se trata de disponer de ciertas tecnologías

sostenible y sin impacto ambiental, que está requiriendo y va a requerir en los próximos años de un desarrollo tecnológico importante, y donde Ciemat ha jugado un papel trascendental en transferir tecnología desarrollada aquí a industrias del sector que están muy bien posicionadas en ámbitos europeos. Y otro ejemplo es el de la energía solar térmica de concentración. La plataforma solar de Almería es la institución puntera mundial en este ámbito, de gran impacto sobre el sector



son conocidos, pero sí son valorados cuando se los conoce. Estamos empeñados en mejorar la comunicación hacia el exterior y especialmente hacia la sociedad y vamos a poner recursos y empeño en ello para que tengamos resultados a corto plazo.

P: *Teniendo en cuenta la coyuntura económica, ambiental y geopolítica actual, la energía se ha convertido en el principal centro de atención pública. ¿Qué puede aportar el Ciemat en estas circunstancias?*

que ahora mismo no son comerciales, pero en el futuro pueden serlo, y transferirlas a empresas asociadas para que lleguen a implantarse.

P: *¿Puede dar algún ejemplo de desarrollo conjunto o transferencia de la tecnología?*

R: Sí, hay dos ámbitos muy claros. Uno es el de la fusión, como una tecnología a desarrollar activamente para disponer de una fuente de producción energética

industrial. Otro ejemplo son los aceleradores para aplicaciones médicas, en lo que trabajamos también, que va a tener un impacto claro en el diagnóstico y de tratamiento de enfermedades

P: *Tras una época en que hubo una explosión de plantas comerciales de energía solar de concentración, parece que algunas de ellas están cerrando y ya apenas se habla de esta fuente. ¿Qué es lo que ocurre y qué futuro tiene?*

R: Creo que uno de los factores que ha impactado de forma negativa para este tipo de producción de energía es el gran desarrollo de la fotovoltaica. Es decir, ahora mismo la energía fotovoltaica es absolutamente competitiva, muy fácil de instalar, muy fácil de mantener. La tecnología solar de concentración es más compleja en cuanto a su mantenimiento, pero tiene una ventaja clarísima, que es el almacenamiento de energía, y esto es algo que va a mejorar su posición, porque uno de los grandes retos de las energías renovables es el almacenamiento. De hecho, se ha puesto en marcha un proyecto, llamado EU-Solaris, que es un consorcio europeo para impulsar esta tecnología, que va a liderar la Plataforma Solar de Almería.

P: *¿Almacenamiento de energía en general o de electricidad directamente?*

R: Pues en ambas cosas. Durante muchos años, la Plataforma Solar de Almería, como parte de su tecnología, ha trabajado en el almacenamiento de calor con sales, pero estamos también en superconductividad, en volantes de inercia, almacenamiento mecánico. Sí, sí, disponemos de un abanico de tecnologías, más o menos desarrolladas. De hecho, es una de las líneas estratégicas que Ciemat está tratando de priorizar, porque nuestra intención es que lo que hagamos tenga un impacto en la sociedad, y el desarrollo de una mayor capacidad de las energías renovables depende del almacenamiento de energía.

P: *¿Cuál es el mix de producción eléctrica deseable y posible ahora mismo?*

R: A veces lo deseable no es exactamente lo posible. Siendo realista, creo que ahora mismo, en estos momentos tan complicados y de transición, tenemos que aprovechar todas las formas de producción de energía disponibles, y sobre todo aquellas en las que no tenemos dependencia energética de otros países. A futuro entiendo que el mundo energético debería de ser renovable. ¿Cuándo? Yo diría que cuando

estén disponibles las tecnologías a un coste asumible por la sociedad.

P: *¿Entre las renovables cabe incluir a la nuclear?*

R: Bueno, es una energía que tiene impactos sobre el medio ambiente, como la producción de residuos radiactivos de larga duración. Es cierto, sin embargo, que sobre las emisiones de gases de efecto invernadero no lo tiene. Es un tema complejo, porque tendríamos que ver de qué hablamos cuando decimos si algo es verde, ¿es verde porque no emite o es verde porque no tiene ningún otro impacto?

“Si logramos desarrollar los sistemas de gestión del hidrógeno, va a ser una alternativa importante al vehículo eléctrico”

P: *En Europa en general, salvo Francia, se tiende a reducir la vida útil de las centrales nucleares, pero dado que la transición hacia una energía completamente renovable parece complicada a corto plazo, ¿no habría que acompañarla con fisión nuclear todavía?*

R: La posición europea es incluirla, y en estos momentos lo tenemos que asumir. Pero yo iría un poco más allá, porque los impactos son más complejos que eso. Y hay una cuestión importante que a veces se olvida, que es asegurar el suministro.

P: *En cualquier caso, las decisiones no las tiene que tomar el Ciemat.*

R: No, nosotros somos un centro de investigación y por supuesto, estamos en el desarrollo de todas las tecnologías. En el ámbito nuclear también tenemos un papel, que hemos desarrollado históricamente y del que nos sentimos muy or-

gullosos y que creemos que tenemos unas capacidades, yo diría que únicas en este país y vamos a seguir participando y colaborando durante el tiempo que sea.

P: *¿En hidrógeno también trabajan?*

R: Desde luego. Forma parte de nuestro análisis estratégico sumar todas las capacidades que tenemos y el hidrógeno está entre ellas, siempre acompañando a otros recursos y actividades que ya existen en el país para llegar a una complementariedad que es lo que nos va a hacer fuertes en cualquier desarrollo tecnológico. Que el hidrógeno tenga el papel que tenga que tener, y habrá que tomar las decisiones que corresponda si no llega a tiempo.

P: *El vehículo del futuro, ¿va a ser eléctrico o de hidrógeno?*

R: Pues dependerá mucho de cómo se desarrolle el mercado. Desde luego, está claro que uno de los dos va a ser. Esta es mi opinión. El hidrógeno, Si realmente logramos desarrollar los sistemas de almacenamiento y la gestionabilidad del hidrógeno, yo creo que va a ser una alternativa muy fuerte al vehículo eléctrico. Pero va a depender del impulso que se le dé a cada tecnología.

P: *España, además, está bien posicionada, tras el reciente acuerdo entre el Gobierno y algunas empresas.*

R: En España tenemos el Centro Nacional del Hidrógeno, que está en Puertollano y lleva funcionando unos 20 años. Yo creo que son muy punteros en todo el mundo del hidrógeno. Pero no sólo eso, ahora mismo hay un impulso desde el sector público y también del sector privado muy intenso en cuanto a recursos que están poniendo y yo creo que va a hacer que España tenga realmente un papel muy interesante en este campo.

P: *Los ecologistas a veces dicen que ya se podría vivir solo de las renovables. ¿Eso es cierto o solamente una forma de presión?*

R: Mi opinión es que en estos momentos no podríamos vivir sólo de las renovables, porque si así fuera, seguramente



“La contaminación de Palomares está absolutamente contenida y retenida”

P: *Ustedes tienen encomendada la gestión de los terrenos contaminados en Palomares, ¿qué actividad están realizando?*

R: En Palomares somos el organismo encargado de llevar a cabo el Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental, tanto de las personas como del entorno. Y lo hacemos con recursos propios de Ciemat. Tenemos vallada la superficie afectada y llevamos a cabo el plan de vigilancia, y estamos siempre a disposición de los diferentes ministerios o del Consejo de Seguridad Nuclear para aportar la información que nos puedan pedir, desde el punto de vista técnico.

P: *¿Está bien controlado el problema?*

R: Sí, está perfectamente. Hace ya muchos años, desde que se hizo un estudio en profundidad en 3D en el que se identificó cuáles eran las zonas afectadas y qué tipo de contaminación tenían. Eso está perfectamente caracterizado y conocido. Y los planes de vigilancia que hacemos nos indican que no hay ningún tipo de situación diferenciadora, por tener ese emplazamiento, frente a otras zonas que no lo tengan. La contaminación de Palomares es una contaminación que está en el suelo, no es soluble y si no hay ningún tipo de movimiento del terreno está absolutamente contenida y retenida. El plan de vigilancia incluye muestras de alimentos de la zona, plantas, animales, cabras, caracoles, etcétera. Y también la calidad del aire. Y eso se ajusta a los parámetros habituales y se puede detectar cualquier incremento de alguno de ellos.

P: *¿Alguna vez se ha detectado un incremento de esos?*

R: No, no, no. La situación radiológica es bien conocida y el Consejo la conoce. No hay ninguna situación de riesgo radiológico en Palomares. Otra cosa es la situación a la que la población está sometida por vivir en este tipo de emplazamiento, que limita su desarrollo urbanístico o turístico, que sin esta situación podría haber tenido. Este sí que es un daño que se ha hecho históricamente a esa sociedad, pero no problemas de salud o de impactos. ▶

en nuestro entorno cercano ya lo harían. Tenemos que ir a ese objetivo y poner todo nuestros recursos, nuestras capacidades, para conseguirlo, pero todavía estamos un poco alejados de ese objetivo ideal.

P: *¿Es compatible ahorro energético, reducción de emisiones y desarrollo económico?*

R: Totalmente. Es más, yo creo que la eficiencia energética forma parte de todos los planes a nivel nacional y europeo, en las estrategias de aquí a 2030, y además es uno de los vectores que ahora mismo puede ayudar a reducir nuestro consumo energético. Si somos capaces de ahorrar tendría menos cabida el gas y eso reduciría la factura energética en general. La eficiencia energética tiene mucho que ver con procesos industriales, con políticas a gran escala, pero también con las actitudes individuales de cada uno de nosotros en nuestro trabajo y en nuestros entornos cotidianos.

P: *¿Qué investigaciones realizan actualmente en fisión nuclear?*

R: Pues nosotros trabajamos en todo lo que tiene que ver con el ciclo de combustible y aspectos relacionados con la seguridad de los emplazamientos. También con los impactos en el medio ambiente y en el público, tanto en el caso de accidentes como en la gestión normal. Y en todo lo que el sector demande y necesite en cada momento.

P: *Por ejemplo, estudiar qué vamos a hacer con los residuos de alta actividad.*

R: Aquí el Ciemat no puede tener una posición. Es decir, a futuro, lógicamente, España tendrá que tener algún tipo de almacenamiento definitivo y en el plan de residuos que Enresa ha presentado, pues hay unos plazos para disponer de un almacén geológico profundo. Nosotros, como centro de investigación, ayudaremos a definir el mejor emplazamiento, las características, etcétera.

P: *Entre los almacenes temporales y el geológico hay una opción intermedia que*

es la transmutación. ¿Trabaja el Ciemat también en esta línea?

R: El Ciemat fue uno de los precursores de la idea de la transmutación de residuos radioactivos para reducir las cantidades de residuos finalmente almacenadas. Desde 1997 y hasta el momento la transmutación ha sido uno de los puntos importantes del programa de investigación en fisión nuclear, en el marco de múltiples proyectos de Euratom y acuerdos de colaboración con Enresa. El Ciemat debe informar y asesorar sobre la viabilidad de las distintas opciones propuestas hasta ahora y las que puedan surgir en el futuro para la gestión de los residuos y el cierre del ciclo del combustible nuclear.

P: También trabajan en la gestión de espacios contaminados, empezando por algunas de sus propias instalaciones. ¿Cómo avanza el plan de descontaminación, el PIMIC?

R: Yo diría que avanza satisfactoriamente. Es un proceso largo, mucho más largo de lo que todos desearíamos, con muchas etapas. Y es un proceso complejo, que depende también de que encontremos el momento adecuado para poder llevar estos residuos al Cabril, y antes hay que clasificarlos. Hay un porcentaje ya bastante alto del Ciemat que está descontaminado y que estamos pendientes de poderlo dedicar a otro tipo de actividades convencionales. Ahora estamos en vías de firmar otro acuerdo con Enresa, que es el organismo encargado de ayudarnos con el PIMIC. Soy razonablemente optimista y creo que en pocos años el proceso de limpieza podría estar terminado. Otra cosa es saber cuándo podremos volver a darle otro uso. Me atrevería a decir que no queda nada en el Ciemat que nos haga estar especialmente preocupados.

P: La fusión nuclear se presenta como la energía del futuro, pero también como una utopía que nunca va a ser realidad.

R: Pues es una pregunta que desde que me he hecho cargo de la dirección del

Ciemat surge muchísimo. Te preguntan por qué en los planes de previsiones energéticas de aquí a 2030 y 2050 no aparece la fusión. No aparece porque no estará disponible ni en el corto ni en el medio plazo. Los expertos, como mi antecesor, Carlos Alejaldre, están seguros de que se conseguirá, aunque él añade que no lo verá. Y permitirá disponer de una fuente de energía masiva, inagotable, segura y respetuosa con el medio ambiente.

P: De momento, y sin que esté claro que se consiga, el proyecto ITER es probablemente el más caro de la historia.

R: Es cierto que esto choca un poco

“España se sitúa en el tercer lugar, tras Francia e Italia, en el volumen acumulado de contratos para la construcción del ITER”

con las enormes inversiones que está requiriendo, pero, en cualquier caso, todo el desarrollo tecnológico que acompaña esta investigación es muy aprovechable en otros muchos sectores de la sociedad y genera riqueza y empleos de calidad, y creo que eso también es importante. Se ha conseguido involucrar a la industria y al sistema de I+D en un programa internacional que implica grandes inversiones en componentes y servicios de alta tecnología y España se sitúa en el tercer lugar, tras Francia e Italia, en el volumen acumulado de los contratos para la construcción del ITER. Esta participación, que supera los 1000 millones de euros, tiene una importante componente en ingeniería y obra civil pero también en el desarrollo de componentes, como los grandes imanes su-

perconductores, los sistemas de instrumentación y de adquisición de datos, la vasija de vacío o las placas de cobre, cromo y zirconio recubiertas de berilio que cubren la pared interior del reactor. Además, ITER necesita desarrollar materiales, y para ello se cuenta con una nueva instalación llamada IFMIF-DONES.

P: Por cierto, ¿se ha decidido ya la sede de esta instalación?

R: Digamos que oficialmente no, pero todo indica que será Granada, gracias al esfuerzo que está haciendo España. De hecho estamos trabajando como si fuera ya oficial. Va a ser muy importante para España, para Andalucía y para Granada.

P: En ese recorrido hacia la fusión, el Ciemat cuenta el stellarator TJ-II. Tras 25 años de actividad ¿sigue aportando frutos?

R: TJ-II ha contribuido decisivamente a la incorporación de centros públicos de investigación e industrias españolas en el programa internacional de fusión nuclear. En la actualidad es un impulsor de ciencia de excelencia para el desarrollo del programa europeo de stellarator, que es una vía alternativa a los tokamak, como el ITER, y donde hemos hecho contribuciones significativas.

P: ¿De qué manera afecta la nueva Ley de la Ciencia a la actividad del Ciemat?

R: Como organismo público de investigación tiene una incidencia total sobre nuestras actividades; y creo que muy positiva, porque el marco en el que vamos a trabajar es mucho más amigable. Reconoce, por ejemplo, a los tecnólogos, que para un centro como el Ciemat es importante. Afecta al tipo de contratación, que será indefinida para nuestros investigadores y les da un marco de estabilidad. También facilita la gestión de los trámites de los proyectos de investigación y todo lo que tiene que ver con igualdad de género y el desarrollo de capacidades en distintas zonas de España. Son aspectos que se han cuidado en la Ley y que son positivos para el Ciemat y para todos en general. ©



Vista general del supercomputador MareNostrum.

El MareNostrum estrenará su quinta versión a mediados de 2023

España acelera en la carrera de la supercomputación

A finales de 2004, el primer gran supercomputador español aterrizaba en el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). Se llamó MareNostrum 1 y se alzó de inmediato como el superordenador más potente de Europa y el tercero del mundo, destinado a revolucionar la investigación en todo tipo de disciplinas, como química, aeronáutica, biología molecular, medicina, cli-

ma o ciencia de materiales. 18 años más tarde, el BSC-CNS prepara la construcción del MareNostrum 5, con una potencia 7 500 veces mayor que el de primera generación, que lo devolverá a las primeras posiciones en la carrera permanente de la supercomputación mundial. Entre sus nuevos proyectos se incluye la fusión nuclear.

■ Texto: **Patricia Contreras Tejada** | Periodista de ciencia ■

Si la falta generalizada de materiales no lo impide, el nuevo computador estará operativo a mediados de 2023. Con respecto de la versión actual (el MareNostrum 4), tendrá una potencia de cálculo 22 veces mayor. “Europa dispon-

drá de tres equipos de similar potencia de cálculo”, afirma Sergi Girona, director de Operaciones del BSC-CNS, que permitirán, por ejemplo, realizar predicciones mucho más fiables sobre el cambio climático, simular un reactor de fusión

nuclear al completo o producir imágenes médicas para mejorar la detección del cáncer.

Una mayor capacidad de cálculo se traduce en unas simulaciones más precisas, reduciendo la incertidumbre y me-

jorando la aproximación a la realidad, aunque no siempre es posible emularla por la complejidad del problema abordado. Así, Mervi Mantsinen, que dirige el Grupo de Fusión del BSC-CNS, reconoce que actualmente “hacemos todo lo mejor que podemos, pero muchos de los modelos teóricos que convertimos en códigos informáticos tan solo se aproximan a la física real”.

Pese a todo, “nos permitirá ver cosas que ahora no podemos”, dice José María Cela, director del departamento de Aplicaciones Computacionales para la Ciencia y la Ingeniería (CASE, por sus siglas en inglés) del centro. Por su parte, Josep de la Puente, que lidera el proyecto QUS-Tom, también dentro del BSC-CNS, para generar imágenes médicas por ultrasonidos y contribuir a la detección precoz del cáncer de mama para poder reducir el número de mamografías, considera que el nuevo supercomputador aporta “la capacidad de calcular cosas que dentro de diez años se podrán hacer sin él”.

El nuevo supercomputador excederá las fronteras del BSC-CNS y será de utilidad para toda Europa. Puesto que la Comisión Europea ha aportado la mitad de la financiación, tendrá acceso al 50 % del tiempo de computación y lo gestionará a través de convocatorias a nivel europeo. De un modo similar se organizará el acceso dentro de España, según explica Girona, con convocatorias realizadas por la Red Española de Supercomputación, para priorizar las actividades más competitivas. España tendrá acceso a algo más de un tercio del tiempo de computación, mientras que Turquía y Portugal dispondrán de fracciones más pequeñas, proporcionales a su contribución económica.

Quizá el verdadero avance del MareNostrum 5 con respecto a su antecesor no sea tanto la mejora en la capacidad de cálculo como la eficiencia energética que conseguirá. Los más de 300 000 bi-

llones de operaciones que realizará cada segundo implicarán un consumo de energía nada desdeñable, al que se añade el coste de refrigeración para evitar el sobrecalentamiento del sistema. A diferencia de la versión anterior, el MareNostrum 5 utilizará la refrigeración por agua. Un circuito conducirá agua templada por las partes del computador que disipan más calor, expone Girona, calentando el agua que luego se aprovechará para otros cometidos.

Gracias a este innovador sistema, el MareNostrum 5 logra reducir la proporción de energía requerida para enfriar la computadora en comparación con la que consume el ordenador en sí. Además, el BSC-CNS tiene dos equipos dedicados a acelerar los códigos informáticos que se ejecutan en el superordenador. “Al mejorar el rendimiento, se consiguen los mismos resultados utilizando menos tiempo y, por ello, menos energía”, apunta Girona. “Sin embargo, como los orde-

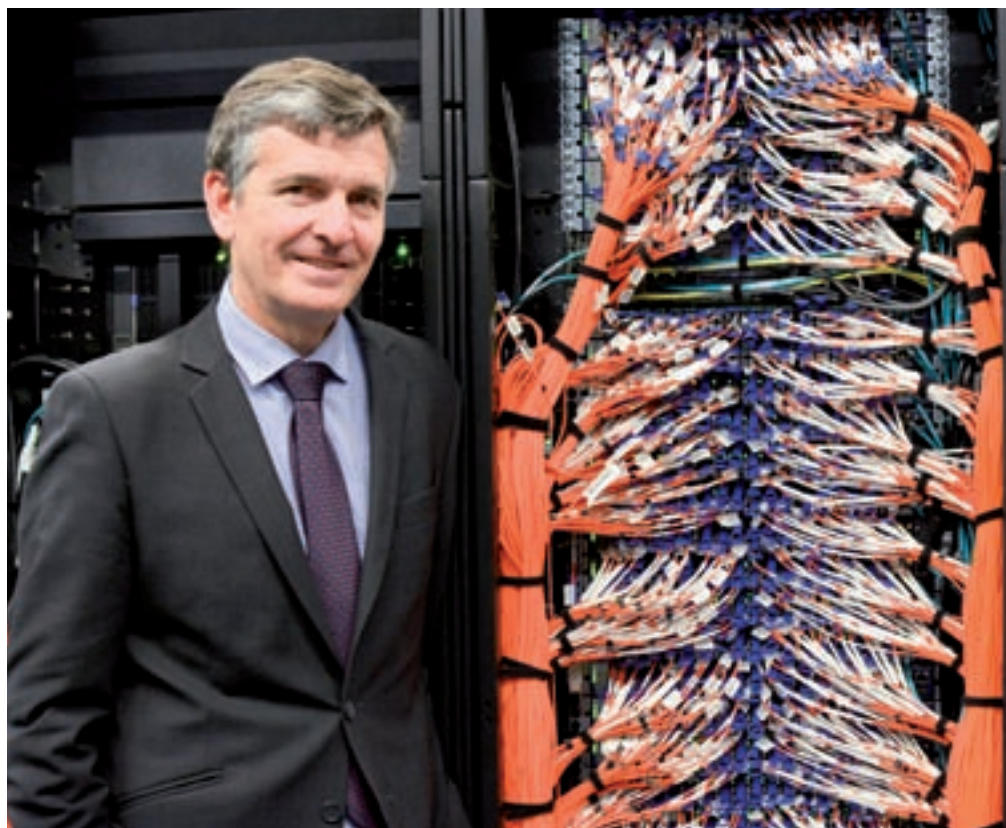
nadores nunca están ociosos, la energía consumida acaba siendo la misma, lo que ocurre es que se pueden solucionar más problemas científicos”, precisa.

El superordenador que está ahora en construcción supondrá un salto considerable con respecto a la capacidad actual. Su posición destacada entre los superordenadores de todo el mundo dará alas a la investigación de nuestro país. “MareNostrum 5 es una herramienta imprescindible para la investigación básica y aplicada en España, que permitirá a los científicos españoles competir y cooperar a nivel mundial en los mayores descubrimientos científicos de los próximos años”, asegura Girona, y De la Puente remata: “el MareNostrum 5 es un vistazo al futuro”.

Imágenes en la nube

“Un falso positivo [en el diagnóstico de cáncer de mama] le cambia la vida a una persona de manera innecesaria”, advierte

BSC-CNS



Sergi Girona, director de Operaciones del BSC-CNS.

el investigador Josep de la Puente. Las semanas o meses que pueden transcurrir hasta que se desmiente el diagnóstico constituyen una carga emocional importante, y el estudio adicional requerido implica un sobre coste para el sistema de salud. El proyecto de Tomografía Estocástica Cuantitativa por Ultrasonidos (QUSTom, por sus siglas en inglés), que dirige De la Puente, aspira a reducir el número de falsos positivos que surgen en los programas de cribado actuales.

El proyecto QUSTom pretende obtener imágenes por ultrasonidos para complementar, quizás en el futuro sustituir, a las mamografías, que actualmente constituyen la técnica principal de diagnóstico para el cribado de cáncer de mama. Además de ocasionar un porcentaje sustancial de falsos positivos, “el principal problema es que emiten radiación ionizante, que limita la usabilidad de esta tecnología”, explica De la Puente, aumentando la edad de inicio en los programas de cribado

jer), en una mamografía puede ser complicado distinguir el tejido sano de los tumores y otras lesiones.

Por eso, su equipo está desarrollando un método de diagnóstico alternativo que proporcione imágenes tan reconocibles como una mamografía pero que supere los inconvenientes asociados a estas. Los ultrasonidos no conllevan radiación ionizante y, además, tanto la resolución como la capacidad de distinguir tejidos en estas nuevas imágenes es mayor. Así, el personal de QUSTom espera que su técnica reduzca los falsos positivos y facilite el diagnóstico precoz del cáncer de mama.

Sin embargo, a diferencia de las mamografías, en la nueva metodología “el procesado de los datos es algo demasiado costoso para hacerse in situ”, expone De la Puente. “Esos datos tienen que desplazarse a un lugar donde se hace un cálculo muy intensivo, y de ahí sale una imagen con un tiempo de retraso y usando unos recursos computacionales que no suelen

cualquier mejora del programa informático que elabora las imágenes se puede implementar de manera centralizada.

Las expectativas sobre el nuevo sistema son elevadas. El BSC-CNS colabora con el Hospital Vall d’Hebron para la realización de este proyecto, un centro donde, según constata De la Puente, “tienen lo mejor en adquisición de imagen y una unidad dedicada a la salud de la mujer con muchísima experiencia en cáncer de mama, pero ven carencias en su metodología”. De ahí el interés en participar activamente en el proyecto QUSTom, dice el investigador: “ven que lo que nosotros proponemos les mejora, y mucho, su capacidad de detectar tumores, sobre todo en estadios tempranos”.

La primera prueba piloto, precisamente en el Vall d’Hebron, comenzará ya a finales de 2022 y constará de un estudio con pacientes que se someten a las pruebas habituales de cribado. Una selección pasará también por el sistema QUSTom para comparar resultados y lograr, según espera De la Puente, “una prueba de concepto” de que la nueva metodología proporciona imágenes comparables a las existentes. Después será necesario realizar un estudio clínico que durará entre dos y tres años, y solo entonces se podrá implantar de manera más generalizada. Son varias las etapas a superar, pero el coordinador de QUSTom tiene plena confianza en que esta nueva técnica llegará a formar parte del repertorio cotidiano de los hospitales: “en cuestión de tres años debería empezar a usarse en algún contexto”.

Soles en la Tierra

“La energía de fusión es segura, muy limpia y abundante, y es accesible para todas las naciones”, afirma Mervi Mantinen. La investigadora lidera el Grupo de Fusión en el BSC-CNS, donde trabaja en modelización y computación de alto rendimiento para conocer mejor los fu-



Entrada a la antigua capilla que alberga hoy el MareNostrum.

y la frecuencia de las pruebas. Más aún, si la densidad de la mama es elevada (algo que ocurre en la mitad de las mu-

ser parte de la imagen convencional”, añade. Por eso QUSTom apuesta por un modelo de computación en la nube que, además, tiene una ventaja importante:

turos reactores de fusión, que Mantsinen define como “un sol caliente en la Tierra”. Estos aparatos están diseñados para unir átomos de hidrógeno y formar helio, el mismo proceso que tiene lugar en las estrellas y que genera una gran cantidad de energía.

Aunque la fusión no es aún viable como fuente de energía, Mantsinen y su grupo forman parte de una comunidad mundial que trabaja para lograr que lo sea. La hoja de ruta que ha definido Europa para orientar la investigación en fusión destaca los modelos computacionales como herramienta clave para conseguir los objetivos propuestos, explica Mantsinen, que zanja: “todo lo que hacemos va dirigido a asegurarnos de que los reactores de fusión funcionen, y que funcionen de la manera más eficiente posible”.

En concreto, estudian cómo calentar el combustible, formado por deuterio y tritio, dos isótopos del hidrógeno, a la altísima temperatura que se requiere para que se produzca la fusión (del orden del centenar de millones de grados) y saber cómo se mueven las partículas generadas al aumentar la temperatura, cuyo comportamiento es “fascinante”, según Mantsinen. Para verificar los modelos computacionales experimentalmente, actualmente se está construyendo un aparato que dilucidará los procesos físicos que hay detrás del rapidísimo movimiento de estas partículas.

Además, el grupo de Mantsinen trabaja para comprender qué materiales son los más indicados a la hora de construir los reactores. Para soportar el enorme contraste de temperatura entre el interior y el exterior hacen falta soluciones innovadoras que los modelos de Mantsinen tratan de diseñar. Como eje transversal a toda la labor del Grupo de Fusión, la computación de alto rendimiento requiere una línea de investigación en sí misma para acelerar los códigos infor-



máticos que ya existen, desarrollar otros nuevos y adaptar las herramientas del BSC-CNS a los problemas relacionados con la fusión. Todo ello va orientado a

“aportar valor a la comunidad de fusión”, recalca Mantsinen.

Si la computación es una herramienta clave en el estudio de la fusión



Josep de la Puente lidera el proyecto Tomografía Estocástica Cuantitativa por Ultrasonidos.

La supercomputación y el Consejo

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) quiere aprovechar la amplia experiencia del departamento CASE del BSC-CNS en la simulación de procesos físicos relacionados con la seguridad nuclear y la protección radiológica. Por ello se ha propuesto llevar a cabo una colaboración que en el futuro permita modelizar, por ejemplo, el comportamiento a largo plazo de los almacenes de residuos radiactivos, donde estos interactúan con la pared del almacén. También tienen interés en simular el comportamiento de los materiales irradiados, así como la interacción entre el núcleo de un reactor nuclear de fisión y el fluido refrigerante. El CSN ya cuenta con algunos modelos en forma de código informático que el CASE espera poder acelerar “para que se ejecuten de forma más eficiente en los computadores”, dice Cela. Otros códigos que aporte el CSN requerirán de un análisis más fino ya que si el modelo depende de varios parámetros cuyo valor no se conoce de manera precisa, sino que pueden variar ligeramente, es ne-

cesario probar muchas combinaciones para conocer qué sucede cuando todos los parámetros cambian a la vez, lo que podría darse en los Análisis Probabilísticos de Seguridad dinámicos. “Es un estudio estocástico”, según Cela, “para simular el efecto acumulado de muchas variables que tienen una pequeña oscilación aleatoria”. Por parte del CSN coordinan esta colaboración los consejeros Francisco Castejón y Elvira Romera, que han acordado con Cela los problemas a abordar en el corto plazo, eligiendo como proyectos piloto uno relacionado con la seguridad nuclear, otro con la protección radiológica y un tercero encaminado al licenciamiento de la futura instalación IFMIF-DONES de investigación en materiales para la fusión, que se instalará en Granada. “Nosotros proporcionaremos las herramientas”, afirma Cela, para que el CNS pueda avanzar en el conocimiento que le permita llevar a cabo su misión en materia de seguridad nuclear y protección radiológica en desarrollos futuros. Es decir, a diferencia de otros proyectos enfocados a la investigación más básica, este “será un proyecto aplicado a problemas concretos que hay en España”

es porque los experimentos no son fáciles de realizar. Con todo, los reactores de fusión a nivel mundial suman casi un centenar, atestiguando la importancia que se le ha dado a esta línea de investigación en las últimas décadas. En cada campaña experimental, al equipo local se suma un contingente de fuera, formando una colaboración dedicada a impulsar cada experimento con el objetivo de que la energía de fusión sea una realidad, porque “somos una comunidad muy internacional, que trabaja unida para conseguirlo”.

La investigadora del BSC-CNS aguarda con avidez el estreno de ITER, un aparato situado al sur de Francia que, según lo previsto, demostrará que la energía de fusión es técnicamente viable. “Toda la comunidad de fusión espera con ilusión la puesta en marcha de esta máquina a lo largo de la década actual”, dice entusiasmada. Según la hoja de ruta europea, para la segunda mitad de siglo será posible tener plantas

de energía de fusión operativas. Pero la investigadora precisa que existen varias iniciativas para acelerar el calendario todavía más, y destaca el reciente interés privado, que está aportando una importante financiación.

Precisamente la dificultad de lograr que la fusión sea una fuente viable de energía es lo que la hace segura, dice Mantsinen, ya que “el proceso es tan complicado de lograr que, si algo va mal, la planta se apaga sola. Hasta donde podemos ver, no habrá grandes accidentes”, detalla. Además, explica que las materias primas necesarias son fáciles de conseguir. El deuterio se encuentra en el agua de mar y el tritio se fabrica a partir del deuterio y el litio, un material “abundante en la corteza terrestre en todas partes”, asevera la investigadora. “En el contexto actual, me gusta la idea de que nadie tenga que depender de nadie”, añade esperanzada. “Cuando tengamos la solución [para generar este tipo de energía], se puede



José María Cela, director del Departamento de Aplicaciones Computacionales para la Ciencia y la Ingeniería.

propagar a todos los rincones del mundo. Esta idea nos da motivación para seguir”, concluye.

Desbancando al laboratorio

Hay problemas que son imposibles de resolver en un laboratorio. A veces falta presupuesto, otras veces falta tiempo y, en otras ocasiones (como para estudiar una supernova), el problema simple-




Mervi Mantsinen, que lidera el grupo de fusión nuclear del BSC-CNS, ante el MareNostrum.

mente excede las dimensiones de la Tierra. En estos casos, la simulación por ordenador es una herramienta clave. Pero ni siquiera sirve cualquier computador: para resolver las ecuaciones que rigen los fenómenos más complejos de la naturaleza hace falta realizar tantas operaciones que se necesita un superordenador como el MareNostrum. Ese es el cometido del Departamento de Aplicaciones Computacionales para la Ciencia y la Ingeniería (CASE, por sus siglas en inglés) del BSC-CNS, que dirige José María Cella, cuyo trabajo abarca desde la interacción del viento con un aerogenerador hasta la estabilidad del plasma dentro de un reactor de fusión. “Además, sabemos programar esos métodos numéricos de forma eficiente en el computador para sacarles el máximo rendimiento”, continúa. Otra estrategia habitual en el departamento es utilizar inteligencia artificial para hacer predicciones en función de un conjunto de datos, sin necesidad de conocer de antemano las ecuaciones que describen esos datos.

“Conocemos las ecuaciones que rigen diferentes fenómenos físicos: fluidos, sólidos, ondas, partículas... Y sabemos aplicar métodos numéricos para resolverlas de la mejor manera posible”, explica

Mientras la comunidad científica espera poder disponer del MareNostrum 5, los ojos del BSC-CNS ya están puestos en la siguiente generación del computador. Actualmente lideran una iniciativa

europea para diseñar aceleradores de bajo consumo eléctrico que disminuyan aún más el coste energético de la supercomputación. “Esperamos poder tener la primera versión cuando instalemos el MareNostrum 6 dentro de cinco o seis años”, sostiene Girona. Se añadirá además el reto computacional de llegar al trillón de operaciones por segundo, casi diez mil veces más que la velocidad disponible actualmente. 



[VIDEO] Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS)



Décima Conferencia de revisión del TNP, celebrada en Nueva York en agosto de 2022, presidida por Argentina.

El tratado de no proliferación de armas nucleares

La proliferación nuclear ha vuelto a primera línea de los informativos en los últimos meses por causa de la agresión rusa sobre Ucrania, si bien la amenaza de un conflicto nuclear estaba latente. El mundo parecía más o menos estable antes de las crisis económicas y de la pandemia; dábamos por hecho una situación de calma tensa e, incluso, el *statu quo* de Crimea y el Dombás. Pero el 24 de febrero pasado se inició en Europa una nueva guerra tras la invasión, de Ucrania por la Rusia

de Putin y las consiguientes amenazas al mundo occidental de desatar una guerra nuclear, a pesar de ser muy consciente de que eso nos llevaría a una DMA, siglas de “destrucción mutua asegurada”, que se hicieron tristemente famosas durante la Guerra Fría y que, sin duda, es un concepto muy actual.

■ Texto: **Alfredo Rodríguez** | director del Máster Universitario en Estudios de Seguridad Internacional de la UNIR ■

La amenaza nuclear no dejó nunca de existir desde el final de la II Guerra Mundial, alimentada por países como Irán y Corea del Norte, que tratan, de forma velada el primero y de forma evidente el segundo, de añadirse al club

de los estados con armamento nuclear. La proliferación nuclear es el mayor desafío existente para la seguridad mundial y el temor a un conflicto interestatal de esta naturaleza fue la gran obsesión de la Guerra Fría, pero actualmente la ame-

naza es tan real como entonces, agravada por la mayor potencia y alcance de los misiles nucleares.

Y es precisamente en esta situación mundial en la que, durante el pasado agosto, se celebró en la sede de Naciones

Unidas en Nueva York la Décima Conferencia de las Partes encargada de examinar el Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares, programada para 2020 y aplazada por la pandemia. Esta décima conferencia de revisión congregó a los 191 Estados parte para revisar la implantación del Tratado y vio algunos cambios de fechas hasta su celebración.

La conferencia se desarrolló en un escenario mundial que presenta importantes desafíos para el régimen de seguridad internacional y para la arquitectura de no proliferación. Las continuas amenazas del autócrata ruso no solo a Ucrania sino también a sus vecinos, que en su mayoría forman parte de la OTAN y de la Unión Europea, ha devuelto al debate la posibilidad de un conflicto nuclear cuyos resultados serían catastróficos, más de lo que ya están siendo para Ucrania, Europa y el resto del mundo.

Tras la Segunda Guerra Mundial, se puso sobre el tablero internacional un instrumento que trataba de evitar este problema y que llevaría al mundo de bloques a la ya mencionada DMA; se trata del Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares (TNP), que nació como un instrumento esencial para prevenir la propagación de estas armas y la tecnología armamentística, para promover la cooperación en la utilización de la energía nuclear con fines pacíficos e impulsar el objetivo de lograr el desarme nuclear y el desarme general y completo. Se trata del único tratado multilateral que representa un compromiso vinculante para los Estados poseedores de armas nucleares respecto del objetivo del desarme; sin embargo, ello no impide al presidente ruso mantener la continua amenaza de usar las armas nucleares, al presidente de Corea del Norte perseguir con ahínco la nuclearización del país y a Irán intentar engañar al mundo sobre sus objetivos.

Los orígenes del tratado

El nuevo orden mundial surgido tras la II Guerra Mundial dividió el mundo en dos partes, el liberal y el que se escondía tras el *telón de acero*, que se disputaban la preminencia y dio paso a la Guerra Fría y a la era nuclear, tras el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki, que ha sido uno de los mayores desastres de la humanidad. Pronto se hizo evidente que el desarrollo de capacidades nucleares permitiría a los Estados emplear la tecnología para fabricar armas de este tipo, y comenzó una carrera desenfrenada para avanzar en su desarrollo y mejora.

La prevención en el uso de estas armas pasó a ser un asunto principal en los debates sobre el empleo de energía nuclear. Todos los intentos por crear un sistema internacional para que los Estados pudieran acceder a la tecnología nuclear con fines pacíficos, que se iniciaron en 1946 y se prolongaron durante casi tres años, fracasaron debido a las diferencias políticas entre bloques y, sobre todo, entre las dos grandes potencias. En ese final de la primera mitad del siglo pasado, Estados Unidos y la Unión Soviética ya habían ensayado la tecnología nuclear y la habían añadido a sus arsenales, que no dejaban de incrementarse como amenaza permanente a la otra parte.

El 8 de diciembre de 1953, el presidente de los EE. UU., Dwight Eisenhower pronunció el célebre discurso “Átomos para la paz” ante la Asamblea General de las Naciones Unidas, en el que pedía que se creara una organización internacional para propagar el uso de la tecnología nuclear con fines pacíficos e impedir a terceros países la capacidad de producir armas nucleares.

Antes de asumir la presidencia de Estados Unidos, Eisenhower había sido jefe del Estado Mayor y primer comandante supremo aliado en Europa (SA-CEUR) de la OTAN, por lo que era per-

fectamente consciente de los dos grandes problemas a los que debía enfrentarse como comandante en jefe de los ejércitos: la impopularidad de incrementar el gasto militar, en un momento en el que la Unión Soviética había desarrollado un programa de armas nucleares y diseñado su primera bomba de hidrógeno, y la desconfianza que mostraban sus aliados europeos ante esta desbocada carrera nuclear.

El fondo de su intervención ante la Asamblea era la Guerra Fría y la carrera armamentística nuclear, pero en lugar de ceñirse a los peligros de la guerra atómica, Eisenhower habló también de la parte cívico social: las aplicaciones de la tecnología nuclear en los más diversos aspectos de la vida, como la agricultura, la medicina y la energía. Por ello, lanzó la propuesta de crear un organismo para fomentar el uso pacífico de la energía nuclear en beneficio de la humanidad. Esta propuesta fue la base para la creación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en 1957, iniciando su actividad en 1958. Con sede en Viena, pertenece al Sistema de Naciones Unidas y es un foro de cooperación científica y técnica que busca la seguridad en el uso de la energía nuclear para la paz, la salud y la prosperidad.

El principio de no proliferación se discutió en Naciones Unidas desde ese mismo año y tomó fuerza al inicio de la década los 60, a medida que quedaba clara la peligrosidad de estas armas y la necesidad de redactar un acuerdo para minimizar el riesgo. En 1968 se alcanzó el consenso para elaborar un tratado contra la proliferación de las armas atómicas, facilitar la cooperación para el uso de esta energía con fines pacíficos y fomentar el desarme de las potencias nucleares.

El artículo X del tratado establecía que se celebrara una conferencia 25 años después de la entrada en vigor para de-

terminar si era conveniente que permaneciese vigente de modo indefinido o si era preferible su prórroga por períodos preestablecidos. Para ello, se convocó en mayo de 1995 la Conferencia de Examen y Prórroga del TNP, en la que los Estados que forman parte del tratado tomaron, sin necesidad de votación, una decisión intermedia pero adecuada: la prórroga indefinida del tratado y la revisión de su texto cada cinco años.

El TNP

El Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares fue el principal esfuerzo mundial destinado a evitar la expansión de este tipo de armas. Contempla la eficacia de las acciones de los organismos internacionales gubernamentales y la cooperación decidida para acabar con la propagación de las armas de destruc-

ción masiva, lo que implica a su vez la prevención, disuasión, detención y eliminación de los programas de proliferación, así como el compromiso de evitar el acceso a grupos terroristas y delincuencia organizada a materiales peligrosos, no solo en el ámbito nuclear y radiológico sino también en el biológico y el químico, así como el control de la exportación de materiales y tecnologías de doble uso en relación con este tipo de armas.

El TNP se firmó inicialmente en 1968 y está vigente desde el 5 de marzo del año 70. Actualmente forman parte del mismo 191 Estados, siendo el tratado que mayor número de adhesiones tiene en este ámbito. De acuerdo con sus disposiciones, se distingue entre las Partes a aquellos Estados poseedores de armas nucleares a los que hayan fabricado y he-

cho explotar un arma nuclear u otro dispositivo bajo esta tecnología antes del 1 de enero de 1967, condición que cumplen cinco Estados: China, Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña y Rusia.

España, firmó el TNP en 1987 y el Protocolo adicional en 2003, y dentro de la Unión Europea, es EURATOM el organismo que aplica las salvaguardias, mientras que el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) se reserva el derecho de supervisar la aplicación de las medidas pertinentes, por un acuerdo entre este organismo y los estados de la Unión.

En el marco de este tratado, los Estados suscriptores se comprometen a:

Quienes tengan armas nucleares no traspasarán a nadie dichas armas ni ayudarán a terceros Estados a fabricarlas ni a comprarlas.

AP IMAGES



Firma del Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares, en 1968.

Los que no las tengan, se obligan a no recibirlas de nadie, a no fabricarlas, y a no solicitar ayuda a nadie para ello. También a no proporcionar materiales básicos (como uranio y torio) ni materiales nucleares especiales (como uranio enriquecido y plutonio) a ningún país no poseedor de armas nucleares sin que tales materiales queden sometidos a salvaguardias.

Cada país no poseedor de armas nucleares acepta las salvaguardias (básicamente obligación de entrega de información y de aceptar el régimen de inspecciones) del OIEA, estipuladas en acuerdos formalizados bilateralmente.

Además, en 1998 se firmó un protocolo adicional en el que se añadía a los materiales controlados por el TNP, a efectos de las salvaguardias mencionadas, una gran cantidad de equipos, detallados en listas muy específicas, que se pueden emplear para actividades no pacíficas.

Los países que tienen en su poder este tipo de armamento están sometidos al TNP, pero de una forma concreta que les permite seguir con los programas militares; estas denominadas potencias nucleares han ido adhiriéndose a diferentes tratados para prohibir las pruebas nucleares en la atmósfera, en el espacio o en el mar y para reducir los arsenales. Estos acuerdos se van cumpliendo y se está procediendo a desmantelar numerosos artefactos y utilizar su material fisionable en reactores comerciales. Es motivo de grave preocupación, sin embargo, la sospecha de que determinados países no poseedores de armas nucleares llevan a cabo programas militares nucleares, lo cual quedó demostrado hace unos años por las pruebas realizadas por India y Pakistán.

Otro actor en esta ecuación complicada es el Grupo de Suministradores Nucleares, compuesto por los países firmantes del tratado que pueden proveer a países no firmantes materiales y equipos relacionados en el Protocolo Adicional

que ya conocemos, siempre que el Estado receptor acredite que va a emplear siempre y en todo caso esos materiales o equipos en instalaciones concretas dentro del acuerdo de salvaguardias del OIEA; es decir, que su empleo va a ser pacífico y no armamentístico.

Sin embargo, este grupo es más importante que todo eso. Los principales países suministradores, que lo forman, han firmado un acuerdo que hace que los suministros requieran la aceptación por el país receptor de un régimen conocido como de Salvaguardias de Alcance Total, que afecta a todas las instalaciones nucleares del país.

Este acuerdo, que España firmó en 1988, impide la exportación de materiales y equipos de unas listas similares a las del Protocolo Adicional a países no firmantes del TNP, como son India, Pakistán o Israel, o firmantes, como Irán o Corea del Norte. Últimamente India ha obtenido un reconocimiento más favorable, reconociéndosele que es un país poseedor de armas nucleares, pese a haber llegado a esta posición después de la fecha del TNP.

Fracaso de la reunión

La conferencia de revisión celebrada en el pasado mes de agosto, ante la evidente amenaza nuclear actual, especialmente por parte de Rusia, pero sin olvidar otros focos de conflicto, dejó un regusto amargo. El secretario general de la ONU, António Guterres, señaló su gran decepción por no haber podido alcanzar un consenso. Las cuatro semanas que duró el encuentro, que tuvo lugar en la sede de Naciones Unidas en Nueva York, terminaron a finales de agosto sin un documento final porque Rusia se opuso a un texto que abordaba su control de las instalaciones nucleares ucranianas. Eso significaba dejar de hacer frente a lo fundamental en la reducción de la amenaza nuclear a través de este tratado que cuenta con 52 años de antigüedad. Ha sido la

segunda vez consecutiva que la Conferencia de Revisión no logra el objetivo, y ello refleja una crisis en la arquitectura de la no proliferación y el desarme y la fragilidad del Tratado.

Los analistas internacionales sabían de antemano que las posibilidades de conseguir avances en esta conferencia de revisión eran escasas, dadas las divergencias entre los participantes, que se han visto aumentadas tras la invasión de Rusia sobre Ucrania, lo que ensombreció la reunión. A pesar de que el borrador final del documento se había debilitado mucho sobre la versión inicial para facilitar el consenso, Rusia se negó a aceptar la versión final y la conferencia terminó sin ese necesario acuerdo. La negativa se justificaba en que los párrafos referidos a la situación en la central nuclear de Zaporíyia no reflejaban la realidad; a pesar de que no se hacía ninguna mención explícita.

El embajador de Argentina, Gustavo Zlauvinen, presidente de esta Conferencia de Revisión, comentó en rueda de prensa su frustración porque las partes no hubiesen adoptado un documento final por consenso. Su comparación fue significativa al señalar que era como si, al final de una película de cuatro semanas de duración, no se hubiese podido plasmar en una foto al final, lo que indicaría que esta película no hubiese existido.

Guterres señaló, al término de la fallida conferencia, “la necesidad de dialogar para reducir la amenaza nuclear a través de este tratado”. En esa misma línea se expresó la alta representante de la ONU para Asuntos de Desarme, Izumi Nakamitsu, quien también mostró su decepción por el resultado final, aunque indicó que “nuestro reto ahora es empezar de nuevo desde aquí y redoblar los esfuerzos para revigorar el camino hacia el desarme nuclear”.

En el ámbito del desarme, China mostró su oposición a incluir referencias a una moratoria en la fabricación de ma-

La nueva red de estaciones automáticas del Consejo de Seguridad Nuclear

Después de más de 20 años de operación, el CSN decidió renovar su red de estaciones automáticas de vigilancia de la radiación. Esta renovación se realizó a partir del estado del arte realizado por un grupo técnico creado *ad hoc*. En el año 2019 se empezó a instalar la nueva red, que se compone de 185 estaciones localizadas en todo el territorio nacional y que tiene la capacidad de realizar análisis espectrométricos en diferentes intervalos de tiempo. La red se terminó de instalar en 2021 y fue complementada con quince estaciones portátiles que solo miden tasa de dosis gamma y que pueden ser co-

locadas en cualquier punto geográfico, ya que su despliegue es extremadamente sencillo. Los datos medidos por la nueva red se almacenan en bases de datos utilizadas por un programa llamado Network Monitoring Centre (NMC), que es el encargado de presentar los datos, tanto en forma numérica como gráfica, realizar cálculos sencillos y exportarlos a otros formatos para ser tratados con otros programas de cálculo que permiten análisis más complejos.

■ Texto: **Juan Pedro García Cadierno** | Jefe del Área de Coordinación de Operaciones de Emergencia del CSN ■

Una de las misiones asignadas al CSN en su Ley de Creación se refiere a la vigilancia y control de los niveles de radiación y contaminación radiactiva, tanto en el interior como en el exterior de las instalaciones nucleares y radiactivas. El incremento sucesivo de centrales e instalaciones nucleares en operación, en cumplimiento del Plan Energético Nacional, llevaron a identificar, a finales de 1985, la necesidad de ampliar la vigilancia de los niveles de radiactividad ambiental y de la posible contaminación de vías de exposición básicas, establecida hasta entonces sólo en las zonas de influencia de las instalaciones nucleares, a otras zonas del país no vigiladas de una manera sistemática.

En 1986 tuvo lugar un accidente en la central nuclear de Chernóbil. El primer signo de que algo raro estaba ocurriendo fue en la central nuclear de Forsmark (Suecia) en la mañana del 28 de abril de 1986. No estaba claro dónde se había producido la fuga radiactiva pese a que el personal de la planta recurrió a todos sus instrumentos de detección. Lo más

lógico fue pensar que la liberación se produjo en el interior de la central nuclear, pero los responsables repasaron todos los sistemas de detección y no había nada debido a Forsmark.

Un análisis les permitió identificar que las partículas radiactivas encontradas en el césped eran específicas de las centrales nucleares soviéticas. Además, durante el fin de semana el viento había soplado desde el sureste y había llovido en el noreste de Suecia, lo que había contribuido a que las partículas radiactivas se depositaran en la zona por el fenómeno de deposición húmeda y seca. Todas las pruebas apuntaban hacia la Unión Soviética y por la noche, dos días después de la catástrofe, Moscú admitió que había ocurrido un accidente en Chernóbil. Ucrania era en aquel entonces una de las repúblicas de la ahora extinta Unión Soviética.

Este accidente puso de manifiesto que era necesario disponer de una red de vigilancia radiológica ambiental detallada y permanente. Así pues, los países que componían la Unión Europea se pu-

sieron manos a la obra y empezaron a desarrollar sus redes automáticas de vigilancia radiológica. Además, el Tratado Euratom establece en sus artículos 35 y 36 que los Estados miembros están obligados a crear las instalaciones necesarias a fin de controlar de modo permanente el índice de radiactividad de la atmósfera, de las aguas y del suelo.

En este contexto, en junio de 1988 se diseñó lo que sería la red de estaciones en continuo que más tarde pasó a llamarse Red de Estaciones Automáticas (REA), las cuales forman parte de la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (Revira). La REA empezó a funcionar en 1991 con la misión de vigilar en continuo la concentración de partículas alfa, beta, radón y radioyodos; además de la medida de la tasa de radiación gamma. Su instalación finalizó en 1992 e inicialmente estaba compuesta por 24 estaciones dentro del territorio nacional y una estación situada en Penhas Douradas (Portugal). Las estaciones de España estaban en puntos donde existía una estación meteorológica automática del Ins-

Tabla 1. Estaciones de la antigua REA.

Estación	Entrada en servicio
Agoncillo (Rioja)	03/92
Almázcara (León)	03/92
Andújar (Jaén)	03/92
Autilla del Pino (Palencia)	09/91
Avilés (Asturias)*	03/92
Herrera del Duque (Badajoz)	09/91
Huelva	03/92
Jaca (Huesca)	05/92
Lugo	05/92
Madrid	09/91
Motril (Granada)	03/92
Murcia	03/92
Oviedo	01/07
Palma de Mallorca	05/92
Penhas Douradas (Portugal)	07/96
Pontevedra	03/92
Quintanar de la Orden (Toledo)	05/92
Saélices (Salamanca)	09/91
San Sebastián (Guipúzcoa)	05/92
Santander	03/92
Sevilla	03/92
Soria	05/92
Talavera la Real (Badajoz)	05/92
Tarifa (Cádiz)	05/92
Tenerife	05/92
Teruel	09/91

tituto Nacional de Meteorología (INM, hoy Agencia Estatal de Meteorología, AEMET).

Para dar cobertura legal a la creación de la red de estaciones automáticas, en la ley 14/1999, de Tasas y Precios Públicos por Servicios Prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear, se modificó su disposición adicional primera con las funciones asignadas al CSN en la Ley 15/1980, de Creación del Consejo de Seguridad Nuclear, atribuyéndole, en relación con la vigilancia radiológica ambiental, las funciones siguientes:

- Evaluar el impacto radiológico ambiental de las instalaciones nucleares y radiactivas y de las actividades que impliquen el uso de radiaciones io-



Figura nº 1. Mapa de la antigua Red de Estaciones Automáticas junto a las estaciones de las comunidades autónomas de Valencia, Cataluña, País Vasco y Extremadura

nizantes, de acuerdo con lo establecido en la legislación aplicable.

- Controlar y vigilar la calidad radiológica del medio ambiente de todo el territorio nacional, en cumplimiento de las obligaciones internacionales del Estado español en la materia, y sin perjuicio de la competencia que las distintas administraciones públicas tengan atribuidas.
- Colaborar con las autoridades competentes en materia de vigilancia radiológica ambiental fuera de las zonas de influencia de las instalaciones nucleares o radiactivas.

Para cumplir ese mandato, el CSN desarrolla su función de vigilancia radiológica ambiental de forma directa con medios propios, mediante acuerdos con otras instituciones y requiriendo, en el marco de su actividad reguladora, a los titulares de las instalaciones el desarrollo y mantenimiento de planes de vigilancia radiológica ambiental en su entorno.

Adicionalmente a esta red, el CSN dispone de acuerdos específicos con las

administraciones autonómicas para ampliar su cobertura dentro de las comunidades autónomas valenciana, catalana, vasca y extremeña.

La antigua Red de Estaciones Automáticas

La antigua REA del CSN estaba integrada por 25 estaciones idénticas, distribuidas según se muestra en el mapa que aparece en la figura 1. Las estaciones de la REA se situaban, por acuerdo entre el INM y el CSN, junto a estaciones automáticas de la agencia meteorológica, compartiendo con ellas la infraestructura (instalaciones, alimentación eléctrica y línea de teléfono) y el sistema de comunicaciones, a excepción de las estaciones situadas en el Ciemat (Madrid) y en Penhas Douradas (Portugal), esta última situada en el mismo emplazamiento que una estación de la red automática de vigilancia radiológica de Portugal. Las estaciones que conformaban esta REA, así como su entrada en servicio se muestran en la tabla 1. En la figura 2 se presenta la imagen de una de estas estaciones.



Figura nº 2. Antigua estación de la REA.

Cada una de las estaciones que integraban la REA del CSN se componía de una estación radiológica automática (ERA) y un discriminador selectivo inteligente de comunicaciones (DSIC). Además, junto a la ERA estaba situada una estación meteorológica automática (EMA) de la red automática del INM.

La EMA dispone de instrumentación para medir temperatura, humedad relativa del aire, dirección y velocidad del viento, precipitación y en algunas de ellas presión atmosférica.

La ERA disponía de instrumentación para medir radiación gamma ambiental (tasa de dosis equivalente ambiental) y concentración de aerosoles ambientales: partículas alfa y beta, radón y radioyodos.

La radiación gamma ambiental se medía con una sonda gamma compuesta por dos detectores Geiger-Müller de baja y alta tasa de dosis, que permitían estimar

Tabla 2. Características de los sensores de la antigua REA.

Variable	Detector		Rango
Radioyodos	Cristal de centelleo	NaI (TI)	$0,5 - 10^7 \text{ Bq/m}^3$
Alfa (α)	Plástico de centelleo	ZnS (Ag)	$0,2 - 0,5 - 10^7 \text{ Bq/m}^3$
Beta (β)	Plástico de centelleo	ZnS (Ag)	$0,2 - 0,5 - 10^7 \text{ Bq/m}^3$
Tasa de Dosis (γ)	Doble cámara	Geiger-Müller	$10^{-2} - 10^7 \text{ mSv/h}^{-1}$

tasas de dosis equivalente ambiental en el rango $10 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1} - 10 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. El detector de baja tasa medía tasa de dosis hasta $2 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ y el detector de alta, hasta $10 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ estando las dos sondas solapadas en una década. La sonda estaba situada en el exterior del edificio o caseta donde se encuentra la ERA.

Los aerosoles se medían aspirando aire del exterior del edificio con una bomba de un caudal aproximado de $5-6 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Este aire se hacía pasar por un calentador para eliminar la humedad antes de atravesar un filtro de papel continuo y un filtro estático de carbón activo. Dichos filtros estaban enfrentados a los respectivos detectores de centelleo de ZnS(Ag) (partículas alfa y beta) y NaI(Tl) (radioyodos). Los resultados de la medida de aerosoles se expresaban en concentraciones de actividad en volumen ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) de partículas alfa, partículas beta y radioyodos.

La ERA estimaba la presencia de descendientes de radón a partir de los contajes alfa y beta y mediante un método de pseudo coincidencias basado en la desintegración del ^{214}Po . En la tabla 2 se muestra un resumen de las características que poseían los antiguos sensores de la REA

El DSIC era un equipo de comunicaciones que tenía como función transmitir los parámetros de control del sistema, almacenar y preparar la información obtenida por la ERA y la EMA para su transmisión al Centro de Supervisión y Control (CSC) de la REA a través de la red telefónica conmutada o telefonía GSM. Estaba compuesto por una CPU, una placa de comunicaciones con modem

incorporado, una fuente de alimentación y baterías.

El Centro de Supervisión y Control (CSC) de la red estaba situado en la Sala de Emergencias del CSN (Salem). Estaba compuesto por un terminal informático desde el que se accede al sistema de gestión y comunicaciones de la REA. Este sistema constaba de un conjunto de programas de adquisición y tratamiento de los datos obtenidos en las estaciones automáticas radiológicas y meteorológicas.

Se trataba de un sistema distribuido y orientado a una red de ordenadores con una estructura cliente/servidor, donde el servidor tenía la misión de adquirir y almacenar los datos recibidos y el cliente, por medio de un explorador HTTP (con soporte Java), accedía al servidor para realizar las tareas relacionadas con la operación y gestión de la red. Los datos almacenados en este sistema permitían hacer cálculos estadísticos sencillos, a la vez que su exportación a la plataforma europea EURDEP (EUropean Radiological Data Exchange Platform).

El grupo de trabajo para la renovación de la REA

Después de más de veinte años de operación, el CSN decidió en 2009 modernizar dicha red de acuerdo con el estado del arte de este tipo de redes, ya que los equipos que la componían empezaban a estar obsoletos. Para ello, se creó un grupo de trabajo en el cual estaban representados el CSN, las comunidades autónomas de Valencia, Cataluña, País Vasco Extremadura, junto con sus apoyos tecnológicos, y el Ciemat (Centro

de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas). Los apoyos tecnológicos en el caso de la Generalidad de Cataluña fueron la Universidad Rovira y Virgili y la Universidad Politécnica de Cataluña, en el caso del Gobierno Vasco la Universidad del País Vasco y en el caso de la Junta de Extremadura, la Universidad de Extremadura. Para avanzar en los trabajos se crearon siete subgrupos encargados de trabajar en las distintas características que debía tener la nueva red. Estos subgrupos se encargaron de:

- G1 “Requisitos funcionales de la nueva red (vigilancia y emergencias)”
- G2 “Tipos de radiación, radionúclidos y sensores en función del tipo de red”
- G3 “Transmisión de datos y software de tratamiento de datos”
- G4 “Niveles de alarma y actuaciones”
- G5 “Integración de la RAR en la nueva red. Viabilidad de la integración”
- G6 “Evaluación de las distintas soluciones de estaciones piloto. Valoración económica y comercial”
- G7 “Propuesta de recomendaciones sobre el nuevo modelo de REA. Informe final”

En el grupo G1 se definieron las características funcionales que debía poseer la nueva REA, que fueron las siguientes:

- Conceptualmente la nueva red se debería clasificar como mixta entre una red de emergencias y una de vigilancia radiológica en tiempo real, si bien la versatilidad en su diseño debe permitir mover su punto de equilibrio de concepto de red.
- La nueva generación de estaciones de la red debe tener las mismas características analíticas y funcionales, tanto en las estaciones ubicadas en el entorno próximo a las centrales nucleares (zona IA de planificación

de emergencias), como en las ubicadas lejos de este entorno, salvo alguna excepción que se indica en el punto 2 de esta propuesta.

- El objetivo de la nueva red debe ser la detección de las alteraciones puntualmente temporales que registre en sus medidas de concentraciones radiactivas o dosimétricas y no la evaluación del término fuente que las ha producido.
- Todas las estaciones deben cuantificar la tasa de dosis con sondas de alta sensibilidad y de nueva generación, así como la concentración radiactiva en aire mediante espectrometría multicanal efectuada sobre filtro continuo para la retención de aerosoles.
- Las estaciones ubicadas en las zonas próximas a las centrales nucleares antes definidas podrían dotarse adicionalmente de capacidad espectrométrica complementaria que permitiese registrar emisiones en condiciones de inversión atmosférica que impidiese la precipitación de aerosoles. Por otra parte, podrían instalarse adicionalmente estaciones de medida también con capacidad espectroscópica capaces de medir la concentración radiactiva en las aguas procedentes de las centrales, localizando al menos una de ellas lo más próximo posible al punto de evacuación.
- La capacidad analítica de la red debe posibilitar la detección, entre otros, de los isótopos que se analizan normalmente en los PVRA.
- Se descarta en definitiva continuar midiendo los valores de actividades alfa y beta totales, así como el nivel del radón, por su bajo significado demostrado durante la experiencia adquirida en la explotación de las redes actuales.
- El objetivo inicial de nivel mínimo

de detección debe situarse en el entorno de los 5 Bq/m³ de actividad en los aerosoles. Por otra parte, los niveles mínimos de detección en agua podrían relacionarse con los establecidos para permitir su consumo.

- La propuesta de la elección de los radionúclidos de mayor interés y en qué estaciones aplicarían se determinará en el Subgrupo G2. A modo orientativo se indican los siguientes:
 - a) Relacionados con liberaciones de material radiactivo procedente de accidentes o incidentes en centrales nucleares: Kr-85, Kr-88, Xe-133, Xe-135, I-131, I-132, I-133, I-135, Te-132, Cs-134, Cs-137, Co-58, Co-60, Mn-54.
 - b) Relacionados con determinadas prácticas radiológicas no identificados en el punto anterior: Ir-192, Se-75, Am-241.
 - a) Relacionado con un dato de referencia de control de calidad de la medida de los equipos como por ejemplo el Be-7 si fuera posible u otro alternativo.

La nueva REA del CSN

Después de más de veinte años de operación se propuso acometer la modernización de la red, teniendo en cuenta:

- Los avances tecnológicos disponibles.
- Las conclusiones del Grupo Técnico para la renovación de la Red de Estaciones Automáticas (GTREA).
- Las lecciones aprendidas tras el accidente de Fukushima.

Esta nueva red, a diferencia de la anterior, se ha diseñado para atender a situaciones de emergencia, aunque puede usarse para la vigilancia radiológica de todo el territorio nacional en situaciones normales.

Esta red está complementada con un conjunto de quince estaciones portátiles que podrán ser usadas en caso de emer-



Figura nº 3. Localización geográfica de las estaciones de la REA según el tipo de cristal que posee la sonda.

gencia nuclear o radiológica, y pueden ser usadas en cualquier localización geográfica, ya que son de fácil montaje e instalación.

La modernización incluye una ampliación del número de estaciones así como una renovación tanto del equipamiento radiométrico como de las conexiones y comunicaciones automáticas con la Sala de Emergencias (Salem) del CSN.

La justificación del cambio venía motivada por las siguientes razones:

- Tener una red de estaciones automáticas de acuerdo con el estado del arte de este tipo de redes.
- Poseer una red más densa sobre el territorio nacional, que permita una caracterización radiológica en detalle en caso de emergencia radiológica o nuclear, tanto de la población como del medio ambiente.
- Poseer una red homogénea a otras estaciones instaladas en otros países europeos.
- Tener una red que permita cumplir, de una manera más adecuada, los compromisos adquiridos por el CSN relativos al intercambio de datos ob-

tenidos mediante las redes de vigilancia automáticas, tal como se indica en la plataforma EURDEP de la Unión Europea.

- Disponer de una red propia de estaciones en el entorno de las nuevas zonas de planificación para emergencias, la cual sería gestionada íntegramente por el CSN en caso de emergencia nuclear, sin depender de servidumbres de terceras partes.
- Poseer una red de estaciones portátiles fácilmente desplegables en cualquier punto geográfico que pudieran realizar una caracterización radiológica en cualquier zona del territorio nacional en la cual no hubiese cerca una estación fija.

Así pues, se diseñó una nueva red de estaciones automáticas compuesta por 185 estaciones fijas con capacidad espectrométrica y quince estaciones portátiles. Estas estaciones están divididas en cuatro subgrupos:

- 141 estaciones que poseen sondas de cristal de centelleo NaI (1.5'' x 1.5'').

- 24 estaciones que poseen sondas de cristal de centelleo NaI (3.0'' x 3.0'').
- 20 estaciones que poseen sondas de cristal de centelleo Br₃La (1.5'' x 1.5'')
- 15 estaciones portátiles que tienen sondas Geiger-Müller de baja y alta tasa de dosis, junto con un sensor de pluviometría.

En la figura nº 3 se presenta la ubicación de las 185 estaciones, de acuerdo con el tipo de cristal de centelleo que poseen.

La fase de instalación de las 185 sondas duró desde 2019 hasta 2021. En el primer año se sustituyeron 44 estaciones correspondientes a las equipadas con cristal de LaBr₃ y NaI (3.0'' x 3.0''). En el año 2020 se instalaron 71 estaciones con cristal NaI (1.5'' x 1.5'') y en el año 2021 se terminaron por instalar las 70 estaciones restantes con cristal NaI (1.5'' x 1.5''). Las quince sondas portátiles se tuvieron a finales de 2018.

Las estaciones de cristal de centelleo (Sondas SARA-ENVINET)

Las estaciones que poseen cristal de centelleo de Br₃La están situadas dentro de las zonas de planificación de emergencias de las centrales nucleares españolas y situadas en los sectores hacia los cuales sopla el viento de acuerdo con los Estudios de Seguridad de dichas centrales. En cada central existen cuatro estaciones de este tipo, salvo en la zona de Ascó-Vandellós donde existen sectores que comparten estaciones. Existe además otra estación en el entorno de la central Santa María de Garoña, que actualmente se encuentra en proceso de desmantelamiento.

Las estaciones que poseen el cristal de centelleo de NaI (3.0'' x 3.0'') están situadas principalmente en las ubicaciones de las antiguas estaciones que conformaban la REA inicial.

Las estaciones que poseen el cristal de centelleo de NaI (1.5'' x 1.5'') están si-

tuadas por el resto del territorio nacional. Principalmente están ubicadas en:

- Las zonas de planificación de las centrales nucleares (al menos una por sector de la rosa de los vientos), salvo en aquellos sectores en las que exista sensor de LaBr_3 . Además se han instalado este tipo de sondas en la fábrica de combustibles de Juzbado, el centro de almacenamiento de residuos de media y baja actividad El Cabril y en una localidad próxima a la central nuclear Santa María de Garoña.
- En capitales de provincia en las que no exista una estación con sensor de NaI (3.0" x 3.0").
- Núcleos de población importantes.

Este detector gamma espectroscópico *in situ* autónomo está diseñado para medir y analizar en línea y de forma continua los espectros gamma en condiciones ambientales. SARA es capaz de detectar incluso cambios menores en la composición de los espectros nucleares en el medio ambiente.



Figura nº 4. Sonda SARA.

Esto mejora significativamente el reconocimiento de isótopos artificiales. No solo admite la detección rápida de radiación artificial, sino que también puede identificar los isótopos nucleares. Está diseñado para uso en exteriores incluso en entornos hostiles y para un funcio-

namiento continuo sin ningún tipo de mantenimiento. La unidad detectora sellada herméticamente garantiza una protección óptima para el detector y la electrónica contra las condiciones ambientales. El detector de centelleo basado en $\text{NaI}(\text{Tl})$ o $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, junto con

Tabla 3. Datos técnicos de las estaciones con cristal de centelleo.

Tipo de detector	SARA-101	SARA-103	SARA-111
Detector espectroscópico			
Cristal	$\text{NaI}(\text{Tl})$	$\text{NaI}(\text{Tl})$	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
Tamaño del cristal	1.5" x 1.5"	3.0" x 3.0"	1.5" x 1.5"
Rango de tasa de dosis ($\mu\text{Sv/h}$)	0.001 - 400	0.001 - 100	0.001 - 1000
Exactitud (%)	± 10	± 10	± 10
Resolución de Energía	< 7.8 %	< 7.8 %	< 3.3 %
Rango de Energía (keV)	30 - 3000	30 - 3000	30 - 3000
Eficiencia (cpm / $\mu\text{Sv/h}$)	61200	260000	62500
Eficiencia del fotopico (cpm / $\mu\text{Sv/h}$)	9900	70600	11300
Fondo intrínseco (nSv/h)	< 5	< 5	100
Analizador Multicanal			
Nº de canales / nº canales usados	8192 / 2048	8192 / 2048	8192 / 2048
Especificaciones eléctricas			
Potencia media (W)	2.2	2.2	2.2
Voltaje (V)	7 - 30	7 - 30	7 - 30
Tamaño y peso			
Diámetro (mm)	90 - 134	91 - 134	92 - 134
Altura (mm)	502	502	502
Peso (kg)	1.89	3.4	1.95

Características

- Detección rápida de muy baja radiación artificial.
- Análisis de espectro *on-line*.
- Identificación de isótopos *in situ*.
- Protocolo de datos estandarizados ANSI N42.42-2012 (basado en XML).
- PC integrado con LINUX para dar la máxima flexibilidad a la gestión de los datos.
- Funcionamiento en condiciones ambientales adversas.
- Operación desatendida absoluta.
- Fácil de mantener - sin consumibles ni piezas de desgaste.
- Diseño robusto (IP 68).
- Configuración fácil y rápida.
- Carcasa de fibra de vidrio optimizada para baja energía gamma
- Antena LTE y GPS integrada

Funciones

- Memoria no volátil para 3 años de datos o más.
- Tres intervalos de agregación configurables por el usuario.
- Evaluación de tasa de dosis para cada intervalo de agregación.
- Evaluación específica de nucleidos: $\text{H}^*(10)$, Bq/m^2 y Bq/m^3 .
- Identificación de nucleidos.
- Rango de tasa de dosis ampliado con detector GM adicional de alta tasa de dosis.
- Biblioteca de nucleidos libremente configurable.
- Gestión de alarmas basada en isótopos.
- Prueba de precisión del detector integrado.
- Acceso a datos y configuración de parámetros con navegador web.
- Límites característicos del análisis de pico/núclido según ISO11929.
- Wifi integrado para servicio inalámbrico.
- Comunicaciones a través de internet y M2M.

el MCA (analizador multicanal) proporcionan una alta resolución de energía en condiciones de funcionamiento a temperatura ambiente. El Linux-PC incorporado e integrado a la sonda permite la identificación de isótopos *on line* y el fácil intercambio de datos a través de varias interfaces. El protocolo estandarizado ANSI N42.42 permite el uso de muchos programas de software de evaluación de espectros. SARA mide la tasa de dosis gamma total y específica de cada radionúclido en unidades de la tasa equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$. Para un rango extendido de tasa de dosis gamma, se puede integrar como opción un detector Geiger-Müller (GM) adicional o un espectrómetro de alta tasa de dosis, que es la opción instalada en las sondas.

Los datos técnicos más reseñables de las estaciones que poseen cristal de centelleo se presentan en la tabla 3.

Las estaciones portátiles (MIRA – ENVINET)

La estación MIRA es un sistema de monitorización de tasa de dosis gamma altamente versátil y muy flexible que mide la tasa de dosis ambiental equivalente $H^*(10)$. MIRA se puede utilizar para instalaciones fijas o temporales, así como para aplicaciones móviles. Una característica particular además de su diseño modular es su capacidad de operación autónoma debido al consumo de energía extremadamente bajo. Por lo tanto, puede funcionar durante muchas semanas con su batería integrada o durante un tiempo de funcionamiento ilimitado con el panel solar integrado. Utilizando las tecnologías inalámbricas de transmisión de datos, la comunicación de datos entre MIRA y el Centro de Monitoreo (NMC) utiliza el servicio GPRS/LTE de redes móviles, un enlace de radio (RF) o incluso comunicación satelital Iridium donde se requiere una transmisión redundante o extremadamente confiable.



Figura nº 5. Sonda MIRA.

MIRA puede funcionar con 5 V CC, desde una unidad de alimentación de un teléfono móvil estándar o puede funcionar de forma autónoma con su batería integrada o sistema de células solares. Se puede fijar fácilmente en un poste o en una pared. En combinación con un trípode, MIRA funciona como una estación de monitoreo móvil y puede implementarse rápidamente en situaciones de emergencia. En consecuencia, MIRA posee un receptor GPS integrado que permite el reconocimiento automático de la nueva ubicación después del despliegue.

Las múltiples capacidades de comunicación de datos permiten numerosas posibilidades de operación y usos.

Para diferenciar los picos de lavado artificial de los naturales, está disponible un sensor de lluvia integrado en la parte superior de la carcasa del detector que no requiere mantenimiento.

Dos detectores Geiger-Muller (GM) le proporcionan un amplio rango de detección desde el fondo natural hasta >10 Sv/h. El detector de tasa de dosis baja

Tabla 4. Datos técnicos de la sonda MIRA.

Rango de detección	10 nSv/h – 10 Sv/h
Exactitud	$\pm 15\%$ (calibrado a Cs-137)
Temperatura de operación	$-40^{\circ}\text{C} - +60^{\circ}\text{C}$
Potencia consumida	< 10 mW
Diámetro	60 mm
Altura	876 mm
Peso	2.0 kg
Protección de la unidad de detección	IP68*

* La protección IP68 se refiere a la protección contra polvo (primer dígito) y contra líquidos (segundo dígito). En este caso nivel 6 contra polvo significa que no entrará polvo bajo ninguna circunstancia, y el nivel 8 frente líquidos significa que no debe entrar agua si el dispositivo se sumerge de forma continua a la profundidad y durante el tiempo que indique el fabricante.

(LD) permite la detección de cambios menores en la radiación a niveles de fondo dentro de ciclos de detección cortos. El segundo detector (HD) se utiliza para medir tasas de dosis más altas. La carcasa del detector sellada herméticamente protege la electrónica y los detectores de las condiciones externas. Los datos técnicos generales de estas sondas se presentan en la tabla 4.

Las sondas poseen baterías solares que proporcionan una autonomía eléctrica de al menos siete días, y pueden conectarse a la red eléctrica a través de la conexión USB que poseen.

El programa de gestión y control de la red (NMC – ENVINET)

NMC es una solución GIS basada en la web para el monitoreo en tiempo real de parámetros ambientales de las sondas SARA y MIRA, aunque también pueden integrarse otro tipo de sondas de otras marcas comerciales. Su diseño modular con funciones de alarma, estadísticas e intercambio de datos permite un ajuste detallado de las actividades de monitoreo del día a día así como la preparación y respuesta a emergencias. NMC soporta acceso a varias bases de datos SQL.



Figura nº 6 Mapa general con las estaciones y el valor de la tasa de dosis de acuerdo con la leyenda situada en la parte inferior derecha, la cual puede ser definida por el usuario.

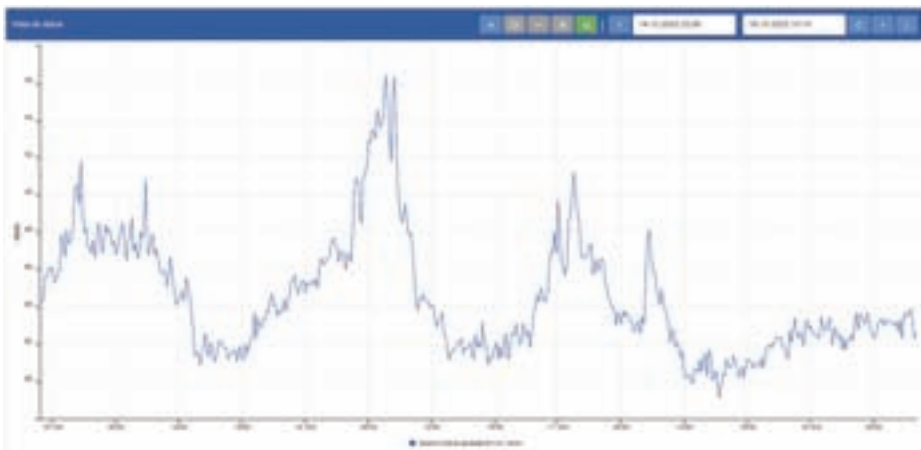


Figura nº 7 Evolución temporal de la tasa de dosis en una de las estaciones de la REA

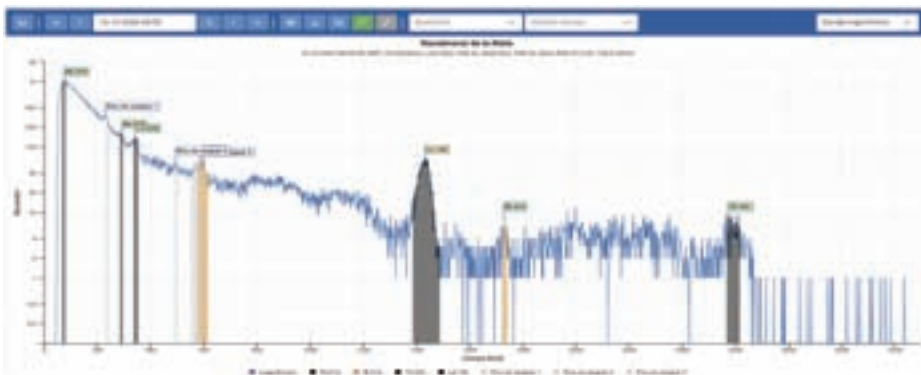


Figura nº 8 Espectro obtenido en una estación medido en 10 minutos

NMC recopila datos continuos y discontinuos de un número ilimitado de estaciones de vigilancia radiológica. La

funcionalidad GIS amplía las posibilidades de presentación más allá de las numerosas opciones para tablas y gráficos.

Se pueden ver todas las estaciones de vigilancia en un mapa, incluidos los valores de medición actuales y el estado en el cual se encuentran todas las estaciones.

Desde el mapa es fácil el acceso a los valores temporales de una determinada estación y se pueden ver los valores máximos y los mínimos. Para cada valor se puede obtener el espectro radiométrico medido por el equipo. Esto se puede realizar para los tres intervalos de muestreo definidos en el software (en el caso del CSN dichos intervalos de muestreo son diez minutos, una hora y un día).

El software NMC permite diseñar alarmas para cada estación y cada radionúclido medido. La generación de informes se realiza de forma rápida, fiable y automatizada, así como la importación y exportación de datos e información, y permite el intercambio de datos entre los sistemas y otros actores externos. Además, el software permite hacer cálculos estadísticos sencillos y programar tareas repetitivas, como el envío horario de los datos a EURDEP. Si es necesario hacer cálculos más complejos, los datos se pueden exportar fácilmente a hojas de cálculo. En las figuras 6, 7 y 8 se presentan las distintas representaciones gráficas que NMC es capaz de hacer con un solo clic.

Pinchando con el ratón en cualquier punto de las estaciones se muestra el último valor de tasa de dosis y al pinchar sobre ese valor se muestra la evolución temporal de la tasa de dosis en la estación elegida. Como puede verse en la figura 7, el intervalo temporal puede cambiarse para visualizar más o menos intervalo de tiempo. Al pinchar con el ratón en un determinado punto de la gráfica, se obtiene el espectro obtenido por la sonda (Figura 8).

El espectro obtenido se puede descargar fácilmente en formato ANSI N42.42, para poder ser interpretado en otros programas de análisis de espectros más detallados. ©

Traslado de un elefante joven para repoblar una zona en Malawi.

MARKUS HOFMEYR



La reintroducción y traslocación de especies permite restaurar hábitats degradados

Reconstruir los ecosistemas

Los ecosistemas se comportan como complejos castillos de naipes donde cada especie es una carta, y cuando alguna desaparece todo el edificio se viene abajo o al menos se tambalea y amenaza ruina. La urgencia de revertir esta degradación ha llevado a Naciones Unidas a declarar este como el Decenio sobre la Restauración de los Ecosistemas. La idea es

devolver a los ecosistemas las piezas que han ido perdiendo, a través de la reintroducción de animales y plantas silvestres, y a veces incluso mediante traslocaciones. Es el as en la manga que los expertos están utilizando para recuperar los servicios que los ecosistemas nos aportan.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | periodista medioambiental ■



turales. Y no solo comida. La economía, los medios de subsistencia y la calidad de vida está amenazadas en todo el mundo por el actual declive de la diversidad biológica, añade un reciente informe de la Plataforma Intergubernamental sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES).

“Cuando una especie desaparece, todo el ecosistema se altera; y como en un efecto dominó las consecuencias se extienden a las poblaciones humanas”, explica Ignacio Jiménez, miembro del Grupo de Translocación para la Conservación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). La translocación con fines de conservación es mover especies silvestres de un lugar a otro para reponer aquellas extintas o en claro declive pero que cumplen roles clave. No se trata ya reintroducir la especie original sino otra semejante, que cumpla el papel de la extinguida. “Es como traer de vuelta las piezas que faltan”,

puntualiza. Aunque no siempre es fácil.

Hace dos años en Argentina, un país donde hay más vacas que personas, se reintrodujo el mayor depredador terrestre de América, el jaguar. Costó quince años que los ganaderos, y la sociedad en general, entendieran la importancia de volver a contar con este gran carnívoro, que tiene un papel esencial en controlar las presas, a sus captores y mantener así el frágil equilibrio de la biodiversidad. La misma virtud que investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Cientí-

ficas le atribuyeron al lince. En su publicación enfatizaron que el felino contribuye a mantener a raya las poblaciones de los voraces zorro y meloncillo, y de los aparentemente inofensivos conejos, cuya plaga ocasiona cuantiosas pérdidas a los hortelanos. Se contribuía, de algún modo, a aplacar la ansiedad de una población preocupada por tener de vecino a un depredador silvestre.

En el caso argentino, funcionó “cambiar el miedo por la oportunidad, generando una economía que antes no existía”, cuenta Sofía Heinonen, directora de la fundación Rewilding Argentina, encargada del proyecto de trans-



RAFA ABUJIN

Ignacio Jiménez.

La lombriz es el intestino de la Tierra. Forma un ejército compuesto por un millón de especies distintas capaces de culebrear, comer y defecar en casi cualquier suelo, volviéndolo apto para la agricultura. Es tal su papel en la supervivencia humana que los egipcios las consideraban dioses menores. Y, sin embargo, lo tendrá difícil con las condiciones climáticas que se esperan, lo que afectará a la producción de alimentos, alertaba el marzo pasado una investigación del Museo Nacional de Ciencias Na-

locación. Compraron tierras de pasto degradadas y consiguieron transformarlas en un destino turístico de naturaleza. “La gente entendió que si, además, hubiera un jaguar sería muy atractivo y atraería a más público; entonces fue la propia comunidad local la que pidió su reintroducción”.

De momento, son pocos jaguares (cuatro adultos y otras tantas crías) en un espacio protegido de 750.000 hectáreas. Heinonen reconoce que a medida que crezca el número de individuos el



A la izquierda, liberación de un pollo de quebrantahuesos en el norte de Castellón; a la derecha, un polluelo de esa especie.

conflicto con el ganado colindante será inevitable. De nuevo, “el apoyo social será esencial para aplacar —y compensar— el enfado del ganadero”, resalta.

Jiménez coincide con su colega argentina. Tras décadas coordinando proyectos de gestión de fauna en Costa Rica, Nicaragua, Madagascar, el Salvador, Sudáfrica y Brasil, considera que “no solo se restaura lo que es ecológicamente necesario, sino lo que es viable social y políticamente: o conectas la conservación de la naturaleza con las necesidades de la gente que convive con ella, o ésta será imposible”. Visión que comparte la decena de conservacionistas que se dieron cita en el primer encuentro mundial de translocación, que se celebró recientemente en el Oceanogràfic de Valencia. Entre sus conclusiones se destaca que “no se trata de elegir entre conservación y desarrollo. No solo es que ambos sean compatibles, sino que una fomenta el otro”.

La belleza sí importa

Un excelente ejemplo de éxito en la reintroducción de una especie lo tenemos en casa: es el caso del lince. Hace dos décadas, en 2002, había 94 ejemplares en España. Este verano, se contabilizaron

más de 1.300. “Es toda una proeza y un caso paradigmático en nuestro continente”, puntualiza Jiménez. En parte se debe a que “no solo en España, sino en Europa, han aumentado los bosques, la superficie de espacios protegidos y las leyes ambientales; también es consecuencia del abandono rural”, destaca este explorador de National Geographic. También, “porque se trata de un animal grande y bonito, que queda bien en anuncios y con el que la gente empatiza”. Por lo mismo, pero al revés, no triunfan las campañas para proteger a otra especie icónica española, que también está en peligro: la avutarda.

La avutarda es un pájaro de unos quince kilos y es el ave voladora más pesada del mundo. España alberga tres de cada cuatro ejemplares que existen en el mundo, aunque en los últimos tres lustros ha experimentado una disminución en su población del 30 %, según datos del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (MNCN), del pasado junio. 8.000 ejemplares menos en quince años. Además de no quedar bien en cámara, juega en su contra que viven en espacios agrícolas tradicionales, desplazados por la proliferación de cultivos intensivos. En un intento de evitar su desaparición,

varios centros de recuperación de fauna silvestre nacionales crían este animal en cautividad para reintroducirlo posteriormente en zonas de Cáceres, Granada, Alicante y en el Parque Nacional de Cabañeros, entre otras.

El sisón, la alondra ricotí y, en general, la fauna pequeña asociada a la agricultura familiar, que dominó el paisaje europeo y español durante siglos está en crisis. Los insectos, con las mariposas y las polillas a la cabeza, son otros de los damnificados: la mitad de las especies están disminuyendo rápidamente y una tercera parte puede extinguirse, asegura una investigación de la Universidad de Sidney (Australia) publicada en la revista científica *Biological Conservation*.

Los artrópodos son esenciales como alimento para otros y como polinizadores. Y, además, algunos juegan papeles ecológicos insospechados: en Australia, la falta de escarabajos peloteros que tratan las boñigas de las reses hace que más de un millón de hectáreas esté actualmente cubierta de excremento de vaca. Como Navarra entera. Esto tiene un impacto económico claro porque hay menos pastos y, además, provoca un malestar generalizado debido a la proliferación de moscas y de malos olores. Desde 2017,



WILDLIFE INSTITUTE OF INDIA

Un tigre anestesiado para su traslocación en India.

los propios agricultores están financiando la reintroducción de estos coleópteros seleccionando “especies que no compiten con la fauna nativa, que prefiere los excrementos de los marsupiales”, contaba en una entrevista en El País el entomólogo Jean-Pierre Lumaret, que ha participado en el proyecto.

El investigador francés recordaba otras translocaciones que no fueron tan rigurosas y que llevaron a que insectos introducidos en EE. UU. se dispersaran hasta llegar a Panamá, donde desplazaron a sus primos autóctonos, con los que compartían el mismo régimen alimentario. Para evitar estas intromisiones, la

UICN dicta escrupulosos criterios de reintroducción. Entre ellos, establece salvaguardas cuando los ejemplares a introducir son genéticamente diferentes a los que existen o existieron en la zona. Lo que pasa es que, a veces, demasiadas limitaciones complican la conservación de animales al borde de la extinción. Por

España, puntera en Europa

El caso del lince es uno de los grandes éxitos de translocación. Pero detrás de él hay muchos otros logros que sitúan a los conservacionistas españoles entre los más punteros de Europa. “Si no fuera por las translocaciones que se llevan haciendo décadas en España, no habría ni lince ibérico ni quebrantahuesos ni buitres negros en gran parte del país”, cuenta Ignacio Jiménez, miembro del Grupo de Translocación para la Conservación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Tampoco, águilas. Uno de los próximos retos es reintroducir la foca monje, la única que queda en el Mediterráneo. Para ello, se obtendrán ejemplares de una población que habita en Mauritania e instaurar la primera en la zona de Canarias. ▶



DIEGO DELSO / WIKIPEDIA

También es cosas de plantas

La jara de Cartagena (*Cistus heterophyllus* subsp. *carthaginensis*) es un arbusto con flores de cinco pétalos rosas que se podría ver en un paseo por el Levante español. Eso si el caminante tuviera mucha suerte, pues solo quedan unas pocas decenas de ejemplares silvestres en todo el mundo, algunas de ellas en el Oceanográfico de Valencia. Su escasez la convierte en la única planta en España en situación crítica, según el Ministerio para la Transición Ecológica.

Hasta ahora, la estrategia de reintroducción está basada en la obtención de ejemplares puros de las poblaciones de Murcia, Baleares y Valencia, por separado. Como además produce pocos frutos, es difícil que la incorporación de muchos nuevos especímenes al medio natural sea rápida. Por ello, voces más aperturistas de la conservación están empezando a considerar la idoneidad de utilizar genotipos ligeramente distintos como fuente para las translocaciones.

Los posibles candidatos serían los procedentes del norte de Marruecos y Argelia, donde se expande la subespecie *heterophyllus*. La incorporación de sangre fresca a la población renovarían una población con un elevado grado de consanguinidad y podría aportar ciertas adaptaciones frente a un escenario climático más seco. ▶



La jara de Cartagena es la única planta de España en peligro crítico de desaparición.

eso, también a veces, “se trabaja con lo que hay disponible, aunque no sea lo mejor”, enfatiza Jiménez.

Es el caso del guepardo de la India, cuyo último ejemplar fue abatido en la década de los 50 del siglo pasado. Era codiciado como trofeo por los colonos, cazado por su valiosa piel y acorralado por la ocupación de su hábitat. Su translocación contaba con un gran problema: de la subespecie asiática *Acinonyx jubatus venaticus* solo quedan unos pocos individuos en peligro crítico y en una remota región de Irán. Así que hubo que buscar ejemplares de otro lado, en concreto en Namibia. “La cuestión era tener guepardos o no tenerlos”, subraya el conservacionista indio Yadvendradev V. Jhala. A principios de 2023, el equipo que dirige conseguirá dos importantes hitos: que su nación vuelva a tener a su felino emblemático tras llevar siete décadas extinto; y mover, por primera vez, un gran carnívoro de un continente a otro.

El asunto de la escrupulosidad en las translocaciones tiene dividida a la comunidad científica. El pasado mayo, investigadores españoles, italianos y franceses publicaron una carta en la re-

vista *Science* criticando que la reintroducción del águila pescadora en la Comunidad Valenciana se estuviera haciendo con ejemplares procedentes del centro y el norte de Europa porque “podría desvirtuar la genética de la especie local”. La réplica no se hizo esperar (ni la contrarréplica; que la hubo): si solo se puede contar con los pocos pollos arrebatados a las escasas familias que quedan de este ave en España, establecer una población a medio plazo es imposible. Además, defendía que incorporar nuevos genes puede ser positivo para lograr mayor resiliencia ante el cambio climático.

Ecosistemas resistentes

Uno de los aspectos que se pretende cuando se realizan translocaciones para la recuperación de ecosistemas es que tengan una mayor resistencia ante cambios externos como la irrupción de especies invasoras, de clima, de los usos del suelo y hasta que pueda sobreponerse a incendios, todos ellos principales amenazas de la biodiversidad. Según un estudio de la Estación Biológica de Doñana, la Universidad de Cádiz y la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica), “a medida que la comunidad se



Translocación de venados de las pampas en Argentina.

hace más compleja y que se reintroducen interacciones, mayor es la probabilidad de adaptación”. Por ello, no se suele reintroducir una única especie, sino varias. Un

ejemplo de ello es el proyecto argentino, donde la vuelta del jaguar ha venido acompañada de la reintroducción de otras 13 especies de animales silvestres,

cada una con un rol distinto dentro del ecosistema. Una es el guacamayo rojo, un ave de gran porte capaz de dispersar las semillas de vegetales autóctonos. Pero, también, se han incorporado herbívoros como los venados de las pampas, el oso hormiguero y la nutria gigante, entre otros.

Como subraya Sofía Heinonen, “se trata del proyecto de reintroducción más completo de Sudamérica, concebido para que sea resiliente”. Y uno de los más costosos, ya que supone un millón de euros al año. En general, resulta más caro restaurar procesos ecológicos que preservarlos, pero, al menos, a la humanidad le queda siempre ese as en la manga. “Y aunque la translocación se suele reservar para situaciones muy desesperadas, es mejor no esperar a que sea demasiado tarde”, concluye Ignacio Jiménez. ©



Sofía Heinonen con un compañero en el centro de reintroducción de jaguares de Argentina.



La inmersión virtual abre nuevas oportunidades de negocio en simulación, diseño y formación

Metaverso, la tecnología del siglo XXI

Desde los albores de la humanidad, el ser humano ha levantado la vista al cielo y se ha preguntado si habría otros mundos más allá de las estrellas. Miles de años más tarde, los humanos actuales están inmersos en una nueva carrera espacial hacia la Luna, Marte y más allá. Pero, además, está empeñado en mirar hacia otra realidad, más cercana, pero a la vez tan infinita como la imaginación pueda concebir. Los avances tecnológicos han posibilitado

un nuevo espacio que no tiene fronteras: el metaverso; que significa, etimológicamente, más allá del universo. Supone un nuevo territorio que trasciende internet integrando el espacio 3D y no es solo un mundo dedicado a los videojuegos o el entretenimiento: promete transformar también la industria, la ciencia y la docencia, entre otros ámbitos.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** | periodista de ciencia ■

Aproximadamente un año después de que, a finales de octubre de 2021, internet contuviera el aliento con el anuncio del cambio de nombre de Facebook a Meta, con todo lo que eso implicaba, echamos la vista atrás para en-

tender qué ha pasado en estos doce meses y hacia dónde se dirige esta nueva exploración que promete impactar en todos los sectores.

Después de unos meses de desconcierto y de leer cientos de definiciones,

parece que ya se puede aglutinar un consenso en la definición: el metaverso es el futuro de internet tal y como lo conocemos, que ahora pasa a ser tridimensional, por lo que la experiencia de navegarlo se convierte en una inmersión en tiempo

real mucho más interactiva y sensorial. Ese espacio virtual, ese nuevo internet, será un mundo infinito que conectará otros muchos submundos. Por eso, más que de metaverso, en singular, tiene más sentido hablar de metaversos.

¿Cómo se accede? Nos vienen a la mente vistosas gafas futuristas, la principal puerta para entrar, pero no hay que confundir conceptos anteriores. “Tanto la realidad virtual (donde el dispositivo te aísla y vives en el mundo virtual, como con las Oculus de Facebook) como la realidad aumentada (una forma de poner objetos virtuales en el mundo real, como las Hololens de Microsoft) son puntos de acceso al metaverso. Puedes utilizarlos para navegar por él y experimentar en el mundo virtual”, explica Ahmed Banafa, profesor de la Universidad Estatal de San José, reconocido como la voz tecnológica principal a seguir por LinkedIn en 2016.

El de las gafas es ya un mercado en auge y para diferentes bolsillos: a partir de 3.300 euros puedes encontrar las Magic Leap, de cristales transparentes, que integran mundo virtual y real; y por unos 400 euros las gafas Nreal, la versión china. Pero no es imprescindible tener gafas de realidad virtual.

Si no las tenemos y accedemos con un móvil o un ordenador (como accedemos ahora a internet de forma tradicional), la experiencia se reducirá a un metaverso plano en dos dimensiones, un ‘protometaverso’ en el que no se podrá vivir la experiencia completa, y esta es una de sus primeras barreras.

“La sociedad en general no tiene estas gafas y los dispositivos todavía son incómodos como para llevarlos más de unos 15 minutos. Así que no está mal empezar por una interfaz más sencilla, como la web o un smartphone, y dar el salto poco a poco”, dice Soraya Cadalso, cofundadora de Uttopion, empresa que ha desarrollado el primer metaverso fundado en España.

Más que un videojuego

Si hay gafas de realidad virtual, un mando y un teclado, de entrada el metaverso puede recordarnos simplemente a otro videojuego, como Roblox o Fornite; a mundos virtuales como Decentraland o The Sandbox, plataformas de realidad virtual descentralizadas y 3D, que pueden considerarse protometaversos; o al intento con el que más se compara al metaverso, la comunidad virtual Second Life.

Pero el metaverso no es solo un videojuego

canal para dar a conocer sus productos y sus servicios, celebrar eventos, posicionarse y abrirse a nuevas comunidades”, sintetiza.

Todo eso está a su vez relacionado con algo que no se incluía en los videojuegos: el ámbito profesional. “En el metaverso se incluyen entornos laborales y, en cierta manera, es el videojuego el que se incorpora al trabajo mediante la gamificación empresarial. Esto se está democratizando y estamos añadiendo estas dinámicas a escenarios diversos”, detalla Pedro Lozano, cofundador de Imascono, estudio de tecnologías creativas especializado en realidad extendida. Esto se puede aplicar a todos los sectores e industrias, con el metaverso como paraguas digital.

Cada día se publica una noticia distinta relacionada con el metaverso, su sinfín de aplicaciones o las empresas que están apostando por él. En el último año, Microsoft, Apple, Google, Nvidia, Epic Games, Nike, Disney y, por supuesto, Meta



Ahmed Banafa.



Soraya Cadalso.

más (aunque en sus distintos mundos puedan incluirse estos como parte del ocio). Por la manera en que se construye, “la base del metaverso, sus piezas, son videojuegos”, explica Cadalso, pero el metaverso destaca por la interacción social y económica. “Hay una economía asociada con usuarios que utilizan este

han invertido miles de millones en él.

Zara lanzó una colección de ropa en este mundo virtual, Lime Glam; LaLiga española de fútbol va a utilizar Decentraland para un proyecto que acerque el fútbol a las nuevas generaciones; Orange ha inaugurado su primera tienda en el metaverso; de Muse a Billie Eilish o Aria-

na Grande, los conciertos en protome-taversos proliferan.

Ya se habla del metaverso como destino turístico y como espacio para la creatividad y el arte, como estadio para eventos deportivos y escenario de la cultura, y como herramienta médica para poder interactuar de maneras más inmersivas con el paciente y para que los cirujanos noveles puedan practicar mediante simulación de operaciones. También como un nuevo espacio inmobiliario: se puede recrear una urbanización digital para que el posible comprador la visite o viva en ella (virtualmente) antes de comprarla.

Esto nos dirige a un símil con el mundo real: la adquisición o alquiler de

atraer a gente para mostrar tus servicios, organizar eventos o tener reuniones; es marketing digital en 3D. Pero, sobre todo, una de las aplicaciones del metaverso que se subraya es la revolución laboral y educativa, y hablamos de mucho más que de reuniones de trabajo y clases.

Simulación nuclear digital

Hace años que en la industria, especialmente en el sector energético, se utiliza el concepto de gemelo digital (*digital twin*). Con este gemelo se puede crear una copia virtual de fábricas, generadores, estaciones y plantas del mundo real, y experimentar con esta versión digital para poder predecir errores o investigar mejoras. Ahora, "el metaverso es el si-

y espacio. Esto puede tener un potencial enorme en la industria nuclear y radiológica; por ejemplo, con simulaciones para formar y entrenar a operadores de centrales nucleares e instalaciones radiactivas. Es algo que ya se viene haciendo mediante simuladores que imitan deta-



Ana Karen Zapata.

Coste energético vs. adalid de la sostenibilidad

Mientras que esperamos al futuro del metaverso, hay otro aspecto transversal ineludible: analizar su sostenibilidad. Aunque nuestro avatar no tenga un cuerpo real, nuestra actividad en el metaverso sí dejará huella (de carbono) sobre el medioambiente. ¿Podrá compensarse la energía que gaste con lo que ayude a ahorrar? ¿Habrán otros proyectos positivos para el medioambiente y la sociedad?

Primero, algunos datos. Intel, uno de los mayores fabricantes de ordenadores del mundo, ha estimado que el gasto energético necesario para mantener el metaverso será 1.000 veces superior a las necesidades computacionales actuales. Un problema que ya se atisbó, por ejemplo, con Second Life: en 2006, los avatares de este mundo virtual

consumían de media tanta electricidad como las personas (reales) de Brasil. En ese momento, solía haber conectados entre 10.000 y 15.000 avatares en Second Life. Imaginémos cuánta gente podría conectarse hoy en día al metaverso y cómo se dispararía esa cifra. Además, todo esto se almacena en centros de datos y en la nube, con su consiguiente gasto energético.

"En el metaverso hay una constante necesidad de energía y evidentemente hay una contaminación. Como no todo se puede reducir, las tecnológicas deben compensar. Por ejemplo, Microsoft cambió todas sus fuentes de energía a energía verde", sugiere Ana Karen Zapata, directora de operaciones de ClimateTrade, plataforma especializada en compensación de

locales o terrenos (digitales). Compañías de distintos sectores, como Gucci, Warner Music, Adidas o JP Morgan, ya están invirtiendo en tener su hueco en las plataformas y metaversos más populares.

Puede parecer tirar el dinero, pero si retomamos la visión de que el metaverso es el internet del futuro, comprar una parcela en él es lo mismo que comprar un dominio de internet. Tu hueco en el metaverso será un espacio donde

guiente nivel de la tecnología del gemelo digital, donde se podrá trasladar ese modelo virtual al mundo digital para realizar demostraciones, estudiar situaciones, compartir información, intercambiar datos y solucionar cualquier problema", explica Ahmed Banafa.

Si a esos gemelos digitales le añadimos la posibilidad de inmersión personal que ofrece el metaverso, la simulación puede ser completa: persona, máquina

lladamente la sala de control de una central, como hace Tecnatom con las nucleares españolas, pero permitiría hacerlo con un coste menor (sin necesidad de que la reproducción sea física) y con más posibilidades de interacción, introduciendo cambios y mejoras y permitiendo la formación continua de los operarios.

Víctor Javier Pérez, experto en metaverso y realidad virtual y coordinador del Metaverse Executive Program de ISDI,

recopila algunos posibles casos de uso en Estudio Metaverso, más allá del *gaming*. Por ejemplo, en la industria, se mejorarían procesos de reparación por parte del soporte técnico al superponer imágenes sobre aquello que se trata de arreglar; en mantenimiento, se podría usar prototipado colaborativo digital en tiempo real con imágenes en 3D.

“A través de las dinámicas del metaverso se podría formar a operarios de todo tipo de sectores: industria, telecomunicaciones, emprendimiento, salud... Cuando se hace con realidad inmersiva, los datos son fascinantes y los usuarios agradecen que la formación sea a través de una dinámica atractiva e interesante”, señala Lozano, de Imascono.

Ya en 2012, investigadores de la Universidad Tecnológica de Nagaoka crearon un proyecto de aprendizaje de seguridad en energía nuclear en un protometaverso:



Concierto virtual en Second Life.

huella de carbono, quien además imagina un mercado de compensación de carbono específico para el metaverso.

¿Y desde los centros de investigación? David Pastor es científico de la Universidad Politécnica de Madrid y codirige una red de investigación sobre gobernanza digital especializada en el desarrollo sostenible con el University College de Londres, el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). “Trabajamos en ponderar los efectos positivos y negativos de la penetración tecnológica a través de distintos objetivos de desarrollo sostenible [ODS], y sabemos que el metaverso va a suponer un consumo mayor de energía por su procesamiento de datos”, dice, pero añade que “nos estamos preparando para ello”.

“El European Innovation Council está invirtiendo en trans-

formación energética, modelos de negocio y redes de distribución, lo que impulsará toda la revolución tecnológica que viene, porque hoy en día tampoco podemos entender y analizar la sostenibilidad sin *big data*, inteligencia artificial y quizá, en el futuro, sin el metaverso”, resume Pastor.

Además, el metaverso también podría compensar emisiones en otros ámbitos de la vida. “Si haces un evento digital en vez de en persona, se reducen emisiones al no haber desplazamiento, ni montaje ni espacio físico”, ejemplifica Zapata, de ClimateTrade. Igualmente, seguiría generando un cierto gasto. Por eso, concluye, “el metaverso debe adoptar desde el principio la sostenibilidad para concienciar, ofrecer herramientas y generar un impacto real; si lo hacemos bien, puede ayudarnos a alcanzar nuestros objetivos sostenibles”.



David Pastor.

el aula virtual se construyó en una isla virtual de Second Life propiedad de dicha universidad.

Todo esto no es totalmente nuevo, “hace años que hay simuladores bastante realistas donde se forman durante muchas horas los pilotos antes de coger un avión de verdad, pero esto es otro nivel de formación”, explica Cristina Cuesta, diseñadora pedagógica en Wetak, empresa de *e-learning*. Las simulaciones en

dades específicas de cada cosa que quisieras enseñar, con elementos audiovisuales y sensoriales. Con el metaverso, se abre un escenario más adaptable y personalizable”, añade la experta.

Igual que la educación cada vez se ha ido digitalizando más, Cuesta cree que “en el futuro todos tendremos nuestras gafas para acceder al metaverso y este tipo de simulaciones y realidades aumentadas serán parte del día a día”.



Decentraland es un protometaverso en el que ya se interactúa en 3D y el usuario puede adquirir una parcela.

Universo de universos

Si desde el anuncio de Mark Zuckerberg, en solo un año se han producido tantos movimientos es porque era un momento de madurez tecnológica, con una penetración relativa de las gafas de realidad virtual, una adopción masiva de ordenadores y móviles y una industria de los videojuegos florecida y con mucho dinero detrás, indica Pedro Lozano: “Es el momento de este tipo de tecnología por el contexto social y de evolución tecnológica que vivimos”.

Cabe preguntarse qué aspectos quedan por pulir. De momento, las plataformas de metaverso que se ofrecen son avatares similares a dibujos animados donde solo figura medio cuerpo (de la cabeza al torso, sin piernas), así que todavía no podemos imaginar un universo que se asemeje de verdad al real. Para ello, habría que virtualizar la realidad, tanto el espacio como las personas. El siguiente paso son vídeos volumétricos, como los que realiza la empresa Volograms, con sede en Dublín, en los que se crea una versión 3D del cuerpo gracias a montones de cámaras

y grabaciones. El siguiente paso en el que trabajan es que, gracias a inteligencia artificial, esto se consiga simplemente a partir de una foto.

Otro escalón que hay que subir en el camino hacia el metaverso prometido



Pedro Lozano.

es la interoperabilidad entre los distintos dispositivos y la continuidad de las experiencias sociales bajo un único entorno, indica Víctor Javier Pérez en su informe Estudio Metaverso: más allá del gaming. Es decir, que no importe si un usuario

entra desde su móvil o con las mejores gafas de realidad virtual, y pueda igualmente interactuar con todos los demás.

Todo esto son solo los retos técnicos; otra dimensión son todos los debates éticos, filosóficos, sociales y psicológicos que, como cada vez que surge una nueva tecnología, hay que abordar. El metaverso deberá tener sus propias normas y su propia regulación, e incluso legislación.

En cualquier caso, “hay que tener en cuenta que el metaverso no sustituirá al mundo real, sino que será una opción para hacer negocios y vivir algunas partes de tu vida. El metaverso llevará esta experiencia a niveles 3D con movimientos y ubicaciones virtuales, con escritorios y mesas diseñadas, en lugar de quedarnos en una cajita en una pantalla en Zoom”, dice Banafa. Este experto augura que esto ocurrirá dentro de entre 5 y 10 años.

De momento, no sabemos si el ser humano llegará antes a pisar Marte o a vivir en un internet 100 % inmersivo en el metaverso, pero sabemos que seguirá explorando más allá de los universos conocidos. ©

Reacción en cadena

NOTICIAS

El aluminio derrota al litio

El factor limitante para conseguir la electrificación completa de los automóviles es el principal componente de las baterías, el litio. No es un material especialmente abundante, su coste es elevado y su extracción produce daños ambientales importantes. Las limitaciones a su producción no permitirían abastecer la demanda de un parque automovilístico mundial completamente electrificado, además de los miles de millones de aparatos electrónicos que las utilizan. Por fortuna, cien-



tíficos del Massachusetts Institute of Technology, liderados por Donald Sadoway, han publicado en la revista *Nature* la alternativa. Se trata de utilizar aluminio para un electrodo, azufre para el otro

y cierto tipo de cloruro sódico como electrolito; Elementos mucho más abundantes y baratos. Según Sadoway, el coste se reducirá a una sexta parte del de las baterías actuales si se inicia

la producción masiva con la nueva fórmula. Las celdas de las baterías construidas con este modelo han sido sometidas a pruebas de carga y descarga y han demostrado que soportan cientos de ciclos. También se ha comprobado que se recargan con mucha rapidez y que soportan temperaturas elevadas (hasta 200° C). Además, ofrecen otra ventaja importante: no pueden explotar ni arder, como ha ocurrido alguna vez con las baterías utilizadas en algunos modelos de teléfono móvil, por lo que algunas compañías aéreas han prohibido su presencia en cabina durante los vuelos. ▶

Gusanos para degradar el plástico

El polietileno es uno de los polímeros más utilizados por su sencillez y bajo coste. Se emplea, entre otras cosas, en bolsas, envases, contenedores her-

méticos caseros, film, tuberías, cubos e incluso en biberones y juguetes. Como otros plásticos, su degradación natural tarda decenas o centenares de años por lo que se busca como reciclarlo en sus componentes básicos

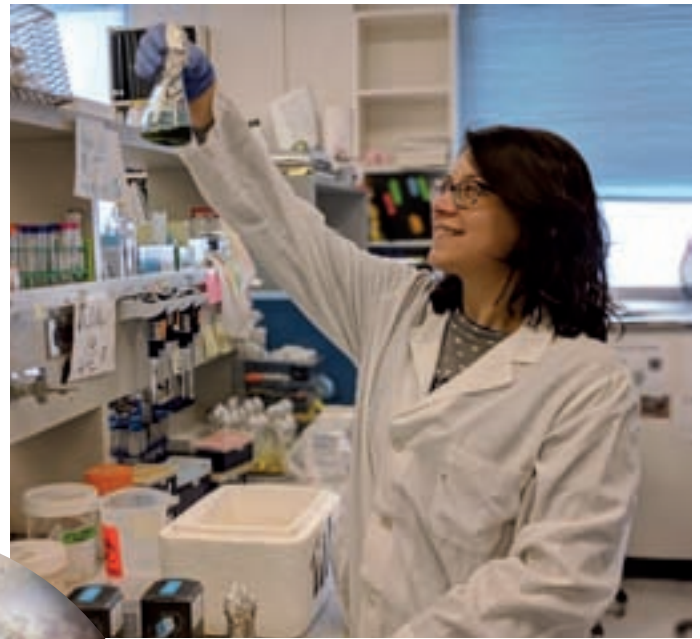
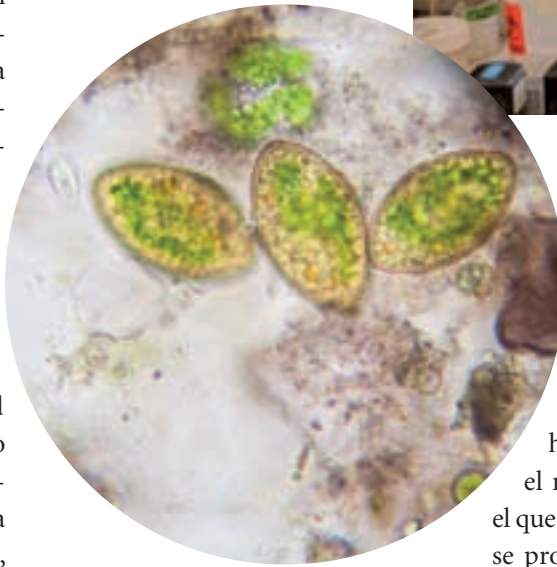
para evitar su impacto ambiental. En 2017, un equipo de científicos del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB-CSIC), dirigido por Federica Bertocchini, descubrió que el gusano de la cera, *Galleria mellonella*, es capaz de degradarlo con rapidez y a temperatura ambiente. Ahora, el mismo equipo ha descubierto su secreto: su saliva contiene dos enzimas, denominadas Demetra y Ceres y pertenecientes a la familia de las fenol-oxidasas, que son las que realizan el trabajo. La investigación se ha publicado en la revista *Nature Communications*, y abre la posibilidad de producir dicha enzima en cantidades suficientes como para su utilización masiva en la degradación del polietileno. ▶



La invención de la energía solar

Aunque hay otros microorganismos mucho más famosos, son las cianobacterias las que han jugado un papel más importante en la historia de la vida, porque descubrieron cómo aprovechar la luz solar para descomponer la molécula de agua para formar otras moléculas; es decir, inventaron la fotosíntesis mucho antes de que aparecieran las plantas. Su actividad cambió la química atmosférica contaminando el aire con oxígeno, un gas letal para las bacterias anaerobias que predominaban por entonces, hace unos 2.500 millones de años. Su papel sigue siendo esencial, ya que generan la mitad del oxígeno que consume la humanidad en la respiración. Un equipo internacional, en el que participa la investigadora María Agustina Domínguez Martín,

de la Universidad de Córdoba, ha desvelado el secreto de su capacidad. Se sabía que captaban la luz solar mediante unos conjuntos de moléculas que forman las llamadas antenas o ficobilisomas. Se trata de un conglomerado complejo de proteínas, y los investigadores han conseguido, mediante criomicroscopía electrónica, dilucidar la estructura tridimensional de



esas proteínas y los cromóforos, los pigmentos responsables de absorber la luz. También han descubierto el mecanismo por el que la cianobacteria se protege de un ex-

ceso de radiación solar, disipando la energía excedente en forma de calor. El trabajo ha merecido un amplio espacio en la revista *Nature* y los científicos creen que puede tener importantes aplicaciones en el campo de las energías renovables, como un nuevo mecanismo para aprovechar la luz del Sol. ▶

EFEMÉRIDES ▶ HACE 250 AÑOS...

Lavoisier resuelve el misterio de la combustión

En 1772, se pensaba que la combustión era un fenómeno en el que la materia que ardía contenía una sustancia llamada flogisto que se iba perdiendo a medida que se quemaba. El considerado padre de la química, Antoine Lavoisier, quiso comprobar si era cierta esta idea no contrastada experimentalmente. En un recipiente cerrado quemó una cierta cantidad de materia y comprobó que el resultado final no solo no había perdido peso, sino que lo había ganado. Dado que el único contacto del material inflamado había sido con el aire dedujo que era alguna sustancia presente en

el aire la que se había combinado con la materia combustible. Y si eso era cierto debería haber creado un vacío parcial en el interior, lo que comprobó observando que al abrir el recipiente



Antoine Lavoisier.

penetraba aire hacia su interior. Midió el peso del aire entrante y comprobó que era igual al ganado por los restos del combustible quemado. Dado que ya se sabía que la oxidación del hierro era un proceso semejante a la combustión, la sustancia debía ser oxidante y de ahí surgió la denominación de oxígeno. ▶

EN RED

El uso correcto del lenguaje científico

El uso de un lenguaje común, el inglés, en la actividad científica facilita el intercambio de información entre los investigadores de todo el mundo y el establecimiento de grupos de trabajo internacionales, pero también contamina la comunicación con el resto de



la sociedad, generando un uso inadecuado de muchos términos. Además, la jerga empleada no siempre resulta accesible y comprensible para buena parte de los receptores de la información. Para dar soporte a la divulgación y la educación en materias de ciencia, la Real Academia Española (RAE) y la Fundación Española para la

Ciencia y la Tecnología (Fecyt) han creado una plataforma web denominada Enclave de Ciencia, que pretende ayudar a los usuarios a comprender el vocabulario científico y técnico y utilizarlo de forma correcta. Su público objetivo son los investigadores, divulgadores y profesores de enseñanzas pre-



universitarias, aunque también está abierto a cualquier interesado en la ciencia. Colaboran en esta web la Real Academia de Ingeniería, la Universidad de Salamanca y la Asociación Española de Terminología.

<https://enclavedeciencia.rae.es/contenidos/inicio>

Por una mejor salud mental

Una de las consecuencias de la pandemia ha sido un aumento en el número de personas afectadas por problemas de salud mental. Ello ha servido, también, para sacar a la luz pública este mundo, aquejado de oscurantismo y desinformación. Para luchar contra el estigma que la sociedad mantiene sobre el problema, proporcionar información adecuada sobre las patologías mentales y ayudar a los que las sufren y sus familias a mejorar su calidad de vida, defender sus derechos y llevar adelante sus de-

mandas, en 1983 nació FEAFES, renombrada en 2015 como Confederación Salud Mental España, que agrupa a 18 federaciones autonómicas, que agrupan a 300 aso-



ciaciones de pacientes. En total el número de personas asociadas asciende a 47.000 en toda España, a quienes, entre otras cosas, proporcionan ayuda para mejorar su inserción social, educativa y laboral, orientar sus actividades de ocio y su vida cotidiana y promover acciones para mejorar la salud mental en general.

<https://consaludmental.org/la-confederacion/>



REDES



@microsiervos

Cuenta en twitter de uno de los blogs pioneros en España, especializado en tecnología, internet, ciencia, fotografía y curiosidades, aderezado con toques de humor y consejos.



laura_astro11

Laura es investigadora en el Instituto de Astrofísica de Andalucía y su pasión es difundir su ciencia en pequeñas píldoras sobre aspectos muy concretos, de forma muy accesible y simpática.



José Miguel Viñas

Esta página permite conocer mejor el tiempo atmosférico, más allá del pronóstico diario, y el clima. Está llena de curiosidades e información de la trastienda de la meteorología.

YouTube

IAEA Nuclear Safety and Security

Cuenta del OIEA en YouTube, donde ofrece vídeos informativos y divulgativos sobre las radiaciones, la energía nuclear y la gestión de la seguridad.



@arquitecturayd

Perfil en Instagram de la revista Arquitectura y Diseño, muestra numerosas imágenes de casas y edificios singulares, mantiene al día a sus seguidores sobre la actualidad en arquitectura y ofrece consejos sobre interiorismo.

AGENDA

Domus: la casa del ser humano

Ángel Rebollo 91

15002 - A Coruña

T: 981 189 840

www.coruna.gal/mc2/es/domus

Con sus cuatro museos dedicados a la ciencia, Coruña puede ser considerada la capital española de la museografía científica. Domus, el segundo de ellos, inaugurado en 1995, es un centro interactivo de ciencia, con la singularidad de estar especializado en el ser humano desde todos los puntos de vista, tanto de su biología como de la cultura. A lo largo del recorrido por el singular edificio, obra del arquitecto japonés Arata Isozaki, vamos descubriendo nuestro cuerpo y nuestra mente en todos sus aspectos. Entre otras, encontramos secciones dedicadas a la genética, la alimentación, la reproducción, los sentidos, los nervios, el esqueleto, la respiración, el corazón o el cerebro y su producto: el pensamiento. Sus más de 150 módulos interactivos nos permiten descubrir cómo funciona el olfato, cómo



NACHOSAN

hacer una dieta sana, a cuantas guías de teléfono equivale la información contenida en nuestro genoma, engañar a nuestros sentidos, entrar en el interior de un corazón o ejercitar nuestra memoria. El símbolo del museo es una versión de la Mona Lisa, el célebre cua-

dro de Leonardo da Vinci, compuesto con los rostros de 10.062 personas de todo el mundo que enviaron su foto. La *Gioconda sapiens*, como se denomina, pretende mostrar a nuestra especie como la suma de la amplia diversidad humana. ▶

LIBROS

Guía del cazador recolector para el siglo XXI Heather Heying y Bret Weinstein

Editorial Planeta, 2022.
197 páginas.

A pesar de la pandemia, de la guerra y de la crisis energética, de la inflación y de los retrocesos de la democracia en el mundo, durante los últimos decenios vivimos

los mejores tiempos de la historia, aunque los humanos parecemos empeñados en vivirlos con angustia más allá de las circunstancias aparecidas en los últimos dos años, que justificarían los miedos de nuestra sociedad, el tedio y la depresión afectan a un número importante de personas de todo el mundo desde hace muchos años, incluso en las épocas más boyantes. Esta contradicción tiene, según Heather Heying

y Bret Weinstein, una explicación en el análisis de nuestra naturaleza e historia. Ambos son biólogos evolutivos y en este libro explican que nuestros males nacen de la disonancia entre el mundo contemporáneo y unos cuerpos y cerebros evolucionados para adaptarse a unas condiciones muy diferentes a las actuales. Y no solo divulgan los pormenores de esa disonancia, sino que se aventuran a dar consejos so-



bre cómo adaptarse mejor a la realidad. ▶

Panorama

El CSN participa en el sexto simposio internacional de la ICRP

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por su presidente, Juan Carlos Lentijo, y por la consejera Pilar Lucio, asistió al Sexto Simposio Internacional del Sistema de Protección Radiológica, organizado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés), que se celebró en Vancouver (Canadá) entre el 7 y el 10 de noviembre. Uno de los temas centrales de la reunión fue la importancia de difundir las recomendaciones emitidas por la ICRP. En esa línea, Lentijo destacó el papel de la comunicación y la divulgación para conseguir los objetivos en cultura de seguridad, con mensajes comprensibles tanto para el público general como para los profesionales. “sin renunciar al rigor y a la precisión técnica”. También se refirió a la contribución del CSN en el documento “Reflections on the Revision of the System of Radiological Protection” de la Asociación Europea de Autoridades competentes en Protección Radiológica (HERCA).

El encuentro sirvió, además, para que la delegación española mantuviera encuentros bilaterales con diferentes reguladores y



organizaciones internacionales, como Nina Crommier, responsable del regulador sueco y presidenta de HERCA; Werner Rühm, presidente de la Comisión Alemana de Protección Radiológica y de la ICRP; y Rumina Velshi, presidenta de la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CNSC, por sus siglas en inglés). ▶

Nombramiento de subdirectores técnicos del Consejo

El 5 de octubre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó el nombramiento de nuevos subdirectores. Dentro del área de Seguridad Nuclear fueron nombrados Cristina Les, en Instalaciones Nucleares; José Ramón Alonso, en Ingeniería; y Juan José Montesinos, en Tecnología Nuclear. En el área de Protección Radiológica, Inmaculada Simón, en Protección Radiológica Ambiental; Isabel Villanueva, en Protección Radiológica Operacional; y Javier Ramón, en Emergencias y Protección Física. De acuerdo con el Estatuto del regulador, el presidente del CSN propone los nombres de los subdirectores y el Pleno en su conjunto aprueba su nombramiento. ▶



Reunión anual con inspectores de las comunidades con encomienda de funciones

El CSN mantuvo los días 25 y 26 de octubre la reunión anual con los inspectores de las nueve comunidades autónomas con las que el organismo mantiene acuerdos de encomienda de funciones. Durante el encuentro se presentó la documentación informativa relativa a las instalaciones médicas contempladas en el Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología y las circulares sobre denominación y condiciones de los recintos de almacenamiento, incidentes en instalaciones radiactivas en el sector de la gammagrafía industrial y utilización de equipos portátiles de rayos X con fines de radiodiagnóstico. También se repasaron aspectos operativos de la inspección del transporte de material radiactivo y de la nueva base de datos de instalaciones radiactivas. Los inspectores presentaron las principales actividades llevadas a cabo en cada comunidad y los resultados del programa anual de inspecciones a instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico de 2021. ▶

España y Portugal impulsan la colaboración en seguridad nuclear y protección radiológica

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por los consejeros Pilar Lucio y Francisco Castejón y el director técnico de Protección Radiológica, Javier Zarzuela, mantuvo el 18 de octubre, en la sede del CSN, un encuentro con la Agencia Portuguesa del Ambiente (APA), regulador de protección radiológica en Portugal, y de la Inspección General de Agricultura, Mar, Ambiente y Ordenación del Territorio (IGAMAOT) encargada de las tareas de inspección, representados por Ana Teresa Perez, vocal del consejo directivo de APA, y Paula Matias, subinspectora general de IGAMAOT. Se trata del primer encuentro bilateral desde la aprobación, en septiembre de 2021, del primer Memorando de Entendimiento entre ambos países. Con una duración inicial de cinco años, el Memorando contempla el compromiso para el intercambio de experiencia operativa y reguladora y la promoción de la I+D, con el objetivo de prevenir los riesgos derivados del uso de las radiaciones ionizantes.

Durante la reunión se abordó la puesta en marcha de las actividades vinculadas al Memorando, el intercambio de información, formación técnica y la colaboración bilateral para el licenciamiento e inspección de instalaciones radiactivas. Asimismo, se repasó la política relativa a las fuentes naturales de exposición a materiales radiactivos de origen natural (NORM, por su acrónimo en inglés), el radón y las novedades del Convenio de protección del medio marino del Atlántico Nordeste.



Se incorporan al CSN 18 nuevos técnicos

El pasado 3 de octubre iniciaron el programa de formación de prácticas, para su posterior incorporación al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de

Seguridad Nuclear (CSN), los miembros de la nueva promoción, compuesta por los 18 técnicos que han superado las pruebas de acceso, de acuerdo con la Oferta de Empleo Público de 2020. Estos funcionarios se suman a los 24 que se incorporaron en 2020, en la anterior convocatoria pública de empleo (correspondiente a 2018). La entrada de estos nuevos funcionarios, nueve mujeres y nueve hombres, supone un impulso a la gestión y transmisión del conocimiento, necesaria para renovar la capacidad técnica de la plantilla del CSN. En la próxima convocatoria pública de empleo se ofertarán 12 nuevas plazas.



Celebración del 30 aniversario de El Cabril

Organizado por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), el 6 de octubre se celebró en el Palacio de Congresos de Córdoba un acto conmemorativo por el 30 aniversario de la puesta en marcha del centro de al-

macenamiento de residuos radiactivos de El Cabril, en el que participaron los consejeros del CSN Javier Dies y Elvira Romera. Eva Noguero, directora de la instalación, subrayó que El Cabril es valorado internacionalmente “como un centro modélico, cuya concepción y tecnología lo colocan a la vanguardia

de las instalaciones existentes en su género”. Por su parte, el presidente de Enresa, José Luis Navarro, declaró que la instalación es la mejor solución para la gestión de los residuos radiactivos y que “ha sabido implicarse en el desarrollo social, cultural y económico de su entorno”.

Principales acuerdos del Pleno

Instrucción Técnica sobre la capacidad de recuperación de combustible gastado

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 16 de noviembre, aprobó una Instrucción Técnica a la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), con el fin de disponer de una instalación que refuerce la capacidad de recuperación del combustible gastado almacenado en los contenedores de almacenamiento y transporte de las centrales nucleares.

Sustitución de aceleradores lineales en hospitales de Valencia y Palma de Mallorca

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 3 de noviembre, acordó informar favorablemente la sustitución de tres aceleradores lineales solicitada por el Hospital Universitari i Politécnic La Fe de Valencia. Esta solicitud se hace en el marco del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología (INVEAT), para su uso en oncología radioterápica. También informó favorablemente la modificación correspondiente a la instalación radiactiva del Hospital Son Espases de Palma de Mallorca para la sustitución de tres aceleradores lineales y la incorporación de un cuarto acelerador, también para su aplicación en oncología radioterápica. Ambas instalaciones deberán notificar al CSN su disposición para iniciar su funcionamiento, para que se puedan llevar a cabo las inspecciones previas a la notificación de puesta en marcha.

Informe favorable de dos propuestas presentadas por el titular de Cofrentes

En la misma reunión del 3 de noviembre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear

aprobó informar favorablemente la propuesta presentada por el titular de la central nuclear Cofrentes (Valencia) relativa a los cambios en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas (ETFM), resultantes de la revisión quinquenal del término fuente requerida en el Manual de Cálculo de Dosis al Exterior, que afectan a los límites analíticos de los parámetros de radiación considerados en las ETFM. También se aprobó una modificación de dicho Manual, como consecuencia de esta revisión

Instrucción Técnica Complementaria al titular de la central nuclear Trillo

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 19 de octubre, acordó informar favorablemente la emisión de una Instrucción Técnica Complementaria al titular de la central nuclear Trillo (Guadalajara), sobre los requisitos aplicables al almacenamiento de aceite lubricante de los generadores diésel de salvaguardia y emergencia, para garantizar que la instalación disponga, en una ubicación sismorresistente, de la capacidad de almacenamiento de aceite lubricante suficiente para el funcionamiento continuo de los generadores diésel de salvaguardia, durante al menos 72 horas, en caso de que se produjera un sismo del mismo nivel que el de las bases de diseño.

Convenio con la NEA para mantener la participación del CSN en proyectos de I+D

En su reunión del 11 de noviembre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó la firma de un convenio con la Agencia de Energía Nuclear (NEA por sus siglas en inglés), perteneciente a la

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), para la participación en el proyecto internacional FACE (*Fukushima Daiichi Accident Information Collection and Evaluation*), cuyo objetivo es profundizar en el conocimiento de la fenomenología de los accidentes severos y la validación de los códigos más utilizados actualmente en el ámbito internacional.

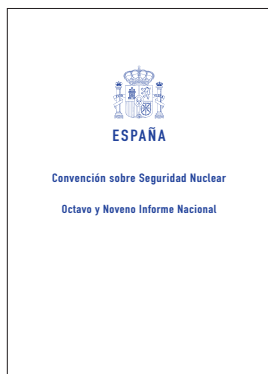
Este proyecto supone una continuidad de dos proyectos previos ya finalizados, sobre análisis de información del edificio del reactor y de la contención, así como de su aprendizaje comparativo, en los que el CSN también ha participado. La duración del convenio es de cuatro años, hasta noviembre de 2026, con un coste para el CSN de 27.275 euros.

Utilización de un código termomecánico en el diseño de recargas de reactores PWR

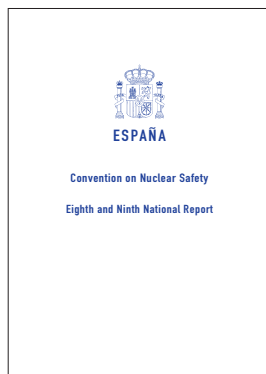
En su reunión del 14 de octubre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear apreció favorablemente –con límites y condiciones– la solicitud presentada por Enusa Industrias Avanzadas, sobre la utilización del código termomecánico PAD5 como método aceptable para realizar los análisis de seguridad del combustible aplicables al diseño de recargas en centrales nucleares españolas y extranjeras.

Dicho código PAD (acrónimo de *Performance Analysis and Design Code*) es un código computacional de evaluación del funcionamiento de las barras de combustible nuclear de diseño Westinghouse de agua a presión (PWR). Para ser utilizado en una central nuclear determinada el titular también deberá obtener la correspondiente apreciación favorable del Consejo de Seguridad Nuclear. ©

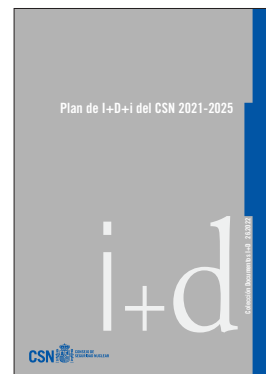
Publicaciones



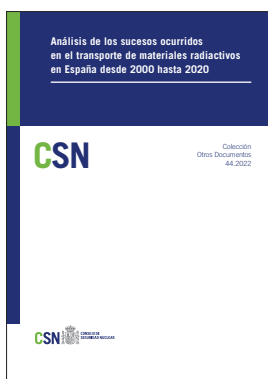
**Convención sobre Seguridad Nuclear
Octavo y Noveno Informe Nacional**



**Convention on Nuclear Safety
Eighth and Ninth Report**



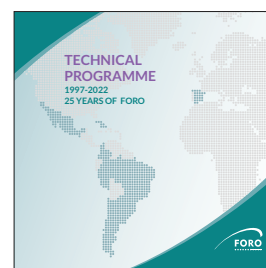
Plan de I+D+i del CSN 2021-2025



**Análisis de los sucesos ocurridos
en el transporte de materiales radiactivos
en España desde 2000 hasta 2020**



**Embarazo y radiación
¿Qué necesito saber?**



**Technical Programme
1997-2022
25 Years of FORO**

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

También puedes suscribirte a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario online: <http://run.gob.es/xdjxkd>

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 In search of the limits of the periodic table

Over the last seven decades, nuclear research laboratories in the USA, Russia, Germany and Japan have increased the number of chemical elements to 118. They are currently working on the creation of elements 119 and 120, with a view to understanding the behaviour of super dense matter and determining whether or not there is a limit closing the periodic table.

12 Radiological safety in veterinary science

Pets are increasingly being treated as members of the family and their owners are demanding healthcare practices comparable to those used in regular medicine. The growing use of advanced technologies in veterinary science requires the application of the same radiological protection measures for the professionals involved, the animals and their owners.

33 Spain ups the pace in the super computer race

The Spanish super computer MareNostrum, at the time the most powerful in Europe and third in the world, started up in 2004. The fifth version of this system will be put into operation in mid 2023 and will allow spectacular progress to be made in different areas of research, such as chemistry, aeronautics, molecular biology and even nuclear fusion.

39 The treaty on the non-proliferation of nuclear weapons

The Russian aggression against Ukraine and the threat of nuclear weapons being used have put the problem of nuclear non-proliferation and the treaty controlling this issue back into the spotlight. The meeting of the signatories to this treaty, held in New York in August, did not manage to achieve its most ambitious objectives.

52 Reintroduction and relocation of species for the restoration of degraded ecosystems

Ecosystems behave like a complex house of cards, with each species being one of the building blocks. When one species disappears, the entire building collapses. With a view to reversing this degradation, the UN has dedicated this decade to the restoration of ecosystems through the reintroduction of wild animals and plants.

58 Metaverse, the technology of the 21st century

Technological progress has opened up a new space without frontiers: the metaverse, a territory that goes beyond the internet by integrating three dimensions. Apart from video games and entertainment, virtual immersion opens up new business opportunities in simulation, design, engineering and teaching, among other areas.

RADIOGRAPHY

26 Integrated Plant Surveillance System (SISC)

The Nuclear Safety Council and the licensees of Spain's nuclear facilities use the SISC system to quickly gain insight into the operation of the country's nuclear power plants and determine what corrective actions should be applied, if required. The system provides this information in accordance with established procedures.

INTERVIEW

28 Yolanda Benito, general manager of Ciemat

"In these complicated times we have to take advantage of all the available energy sources."

TECHNICAL ARTICLES

17 Current situation of temporary dry storage of spent fuel in casks

In Spain there are six temporary facilities for the dry storage of spent nuclear fuel and plans are in place for the construction of two more. The Nuclear Safety Council applies a strict assessment and licensing process to both storage facilities and casks in order to guarantee their safety.

44 The Nuclear Safety Council's new automatic radiological surveillance stations network

The installation of the new network of automatic radiological surveillance stations was completed in 2021. The network is made up of 185 stations distributed across the country and 15 portable stations that provide a number of advantages over the equipment used in the previous network, which was in operation for 20 years.



El CSN en tu bolsillo

Toda la información del Consejo de Seguridad Nuclear, actualizada en tus dispositivos móviles

El Consejo ha rediseñado su aplicación para teléfonos inteligentes y tabletas, tanto en sistema iOS como Android. Dispone de un menú de navegación que permite el acceso a numerosa información, como el estado operativo de las centrales nucleares, los sucesos notificados, los datos ambientales de la Red de Estaciones Automáticas (REA) y de las estaciones autónomas, publicaciones, noticias... Descárgala ya en App Store o en Google Play.



iOS



Android